

NAMUR
1959

3

Cybernetica

ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CYBERNÉTIQUE
INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR CYBERNETICS

Sous la Présidence d'honneur de M. le Gouverneur de la Province de Namur

Conseil d'Administration
Board of Administration

PRÉSIDENT :

M. Georges R. BOULANGER (Belgique), Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons et à l'Université Libre de Bruxelles.

MEMBRES :

MM. René CLOSE (Belgique), Avocat.

Louis COUFFIGNAL (France), Inspecteur Général de l'Instruction Publique, Directeur du Laboratoire de Calcul Mécanique de l'Institut Blaise Pascal, Paris.

John DIEBOLD (U.S.A.), President of John Diebold and Associates, Inc., New York.

W. Grey WALTER (United Kingdom), Sc.D., Burden Neurological Institute, Bristol.

ADMINISTRATEUR-DÉLÉGUÉ :

M. Josse LEMAIRE (Belgique), Directeur de l'Office Économique, Social et Culturel de la Province de Namur.

CYBERNETICA

est la revue de l'Association Internationale de Cybernétique.

Elle paraît 4 fois par an.

is the review of the International Association for Cybernetics.

It is issued four times a year.

Prix et conditions de vente — Price and conditions of sale.

Abonnement annuel — *Yearly subscription :*

membres de l'Association 150,- F. B.

members of the Association 150,- F. B.

non-membres : 300,- F. B.

non-members : 300,- F. B.

Par numéro — *Each number :*

membres de l'Association 50,- F. B.

members of the Association 50,- F. B.

non-membres : 100,- F. B.

non-members : 100,- F. B.

Toute correspondance concernant la revue est à adresser à l'Association Internationale de Cybernétique, 13, rue Basse Marcelle, Namur (Belgique).

All correspondence concerning the review is to be sent to the International Association for Cybernetics, 13, rue Basse Marcelle, Namur (Belgium).

Secrétaire de Rédaction : M. Roger DETRY

CYBERNETICA

VOLUME II

N° 3 - 1959

Revue de l'Association Internationale de Cybernétique
Review of the International Association for Cybernetics

NAMUR

Les articles sont rédigés en français ou en anglais au choix de leurs auteurs. Ils n'engagent que ces derniers.

La reproduction intégrale ou abrégée des textes parus dans la revue est interdite sans autorisation spéciale de l'Association Internationale de Cybernétique.


The papers are written in English or in French according to the choice of their authors and on their own responsibility.

The complete or the partial reproduction of the papers printed in the review is forbidden without special authorization of the International Association for Cybernetics.

SOMMAIRE

CONTENTS

J. SAUVAN : <i>Les systèmes multistatiques</i>	139
B. L. M. CHAPMAN : <i>A self organizing classification system</i>	152
J. POLONSKY : <i>Essai d'interprétation du fonctionnement des cellules vivantes dans le cadre de la cybernétique quantique (suite)</i>	162
R. TOMOVIC : <i>Limitations of Cybernetics</i>	195



Digitized by the Internet Archive
in 2024

Les systèmes multistatiques

par Jacques SAUVAN,

Docteur en Médecine (Antibes)

La notion d'action est une des idées pivot de la cybernétique. Depuis longtemps déjà on s'est attaché à en définir les différents facteurs. L'énumération exhaustive de ces facteurs ne suffit d'ailleurs pas à en donner une image complète ; toutes les propriétés de l'action ne se résolvent pas en la simple conjugaison d'actes préparatoires divers.

De toutes ces analyses, la plus efficace nous a paru être celle de De Latil dans *La pensée artificielle*. Elle est conçue pour classer les automatismes selon leur complexité croissante avec comme référence l'action humaine. Au moment où ce livre fut rédigé, l'homeostat d'Ashby représentait la conquête ultime des machines en fait d'autonomie dans l'action. Si, comme toutes les machines qui l'avaient précédée, celle-ci voyait son but fixé par construction, elle s'avérait disposer, à l'étonnement général, de l'indépendance du choix des moyens propres à aboutir à ce but. Cette notion capitale d'indépendance mériterait un développement particulier ; indiquons simplement que la corrélation qu'il y a entre un système doué d'indépendance et les informations qu'il est en train de recevoir est faible. Ainsi dans l'homeostat, une succession d'informations identiques (chocs sur une palette par exemple), entraîne pour la machine une succession d'états qui ne sont pas reliés par une loi fixe (alors que dans une machine à calculer par exemple, si une succession d'informations identiques donne des états évidemment différents, ces états sont reliés entre eux par une loi fixe, généralement simple, loi d'addition ou de multiplication).

Rien ne permettait alors de penser qu'à l'image de l'homme (ceci sous réserve d'ailleurs), la machine pourrait disposer de l'indépendance du choix de son but. Disons tout de suite que l'étude de telles machines une fois réalisée, a profondément modifié l'idée que l'on pouvait se faire des buts humains et de l'indépendance qui préside à leur choix.

Étant particulièrement convaincu de la validité de l'analyse de De Latil, nous avons eu à ce moment l'idée d'extrapoler sa loi de progression au-delà des phénomènes qu'elle décrivait et de faire assumer par la machine elle-même le choix de son but. On s'aperçoit alors qu'au développement linéaire de l'analyse de l'action doit se superposer un développement dans une seconde dimension. Pour qu'il y ait choix d'un but, il faut évidemment que la machine dispose de plusieurs buts potentiels. Ce groupe de buts potentiels peut être inclus de construction dans la machine et il correspond aux machines multistatiques simples, ou bien ce groupe est composé de buts élaborés par la machine elle-même en fonction de ses propres expériences et il correspond aux *machines ouvertes*. Celles-ci sont évidemment multistatiques mais elles disposent de la faculté supplémentaire de modifier leur façon d'agir ou de réagir en fonction de leur expérience. Dans ces machines, à côté de la notion de but, nous trouvons celle de mémoire et surtout celle de coefficient de satisfaction, ce qui explique qu'à un tel niveau la description des facteurs de l'action devient foisonnante et ne peut plus être linéaire.

Nous avons ainsi situé la notion de multistasie. Ce stade de développement des machines se trouve exposé pour la première fois dans *La pensée artificielle* de De Latil.

En construisant la machine S 4 qui fait la transition entre les multistats purs et les machines ouvertes, nous avons été amené à concevoir un second type de système multistatique. Pour distinguer ces deux types, nous les appelons provisoirement, les premiers multistats séries, les seconds multistats parallèles.

MULTISTAT SÉRIE

Ce type est ainsi nommé parce qu'il se compose d'éléments qui s'informent en série. Il dérive de l'homeostat d'Ashby. Le but de celui-ci (à ne pas confondre avec le but qu'avait Ashby en le construisant) ⁽¹⁾ est de maintenir quatre palettes en face de quatre repères. Changer ce but, c'est obtenir qu'une ou plusieurs palettes tendent à s'immobiliser devant d'autres points. Pour cela il suffit, par exemple, d'amener à la grille un courant de polarisation fixe supplémentaire ; on peut faire en sorte que cette polarisation soit

⁽¹⁾ Cette distinction évidente ici est loin d'être toujours faite. Il y aurait intérêt à donner une définition cybernétique du mot « but ».

commandée par un certain état de l'homeostat qui modifie alors lui-même son but : on a un multistat. Le schéma d'un tel dispositif dont, à ma connaissance un seul exemplaire existe dans la machine S 4 (Cf. Actes du 2^{me} Congrès International de Cybernétique, Namur, 1958) est le suivant (fig. 1).

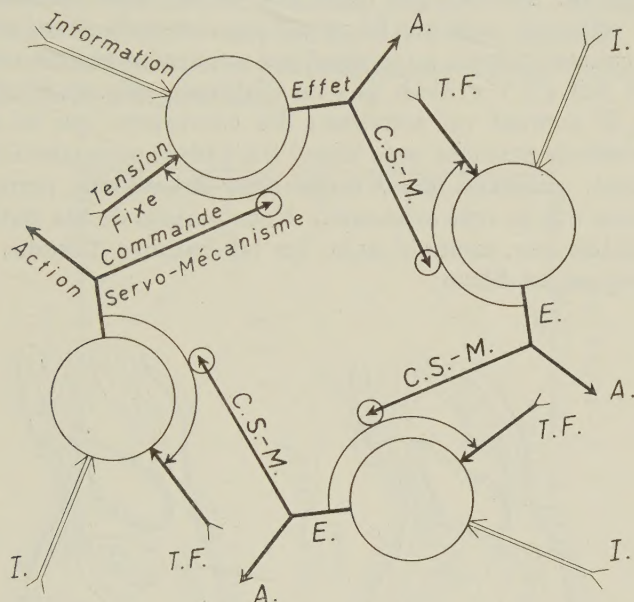


FIG. 1.

Ce système est probablement un bon simulateur du comportement humain lorsqu'il s'agit de décision ; il l'est également de diverses fonctions physiologiques. Cela pourrait donner à penser que ces restructurations internes sont l'apanage du monde organique, du monde vivant. Il existe cependant dans le monde minéral des aspects d'équilibre multistatiques indéniables, c'est-à-dire que l'on rencontre des systèmes dynamiques qui, soumis à des facteurs rigoureusement identiques, peuvent adopter différents points d'équilibre stable. Nous avons pu retrouver un article qui nous avait beaucoup frappé, publié dans « Science et Vie » (N° 239, mai 1937) par Jean Labadié sous le titre *Hydraulique fluviale et mécanique des fluides*. Il y a évidemment des articles semblables dans les revues techniques, mais celui-ci, rédigé pour un public non spécialisé, est particulièrement suggestif. Avec l'autorisation de la rédaction de cette revue, en voici quelques extraits qui méritent que l'on s'y arrête :

« Voici une rivière considérée dans son lit « mineur » c'est-à-dire « à son niveau le plus bas. Une crue survient qui la fait déborder « et combler par conséquent son lit « majeur »... Si nous plaçons un « obstacle entre les deux sortes de rives (majeures et mineures), la « crue vient le heurter et il impose des modifications au courant. « C'est prévu. Mais ce qui n'est pas prévu, c'est qu'une fois la « rivière retournée dans son lit primitif et l'obstacle étant redevenu « sec, le courant mineur ne reprend pas son ancien régime comme il « l'aurait fait s'il n'y avait pas eu d'obstacle (fig. 2). En d'autres « termes, le courant « se souvient » des contraintes que lui a impo- « sées l'obstacle passager avec lequel il n'a plus aucun contact. L'eau « qui court, conserve donc, écrite dans ses remous permanents, « l'« histoire » de la crue évanouie... Nous parlons de lits indéforma- « bles établis par exemple dans les laboratoires d'études hydro- « dynamiques, en béton .

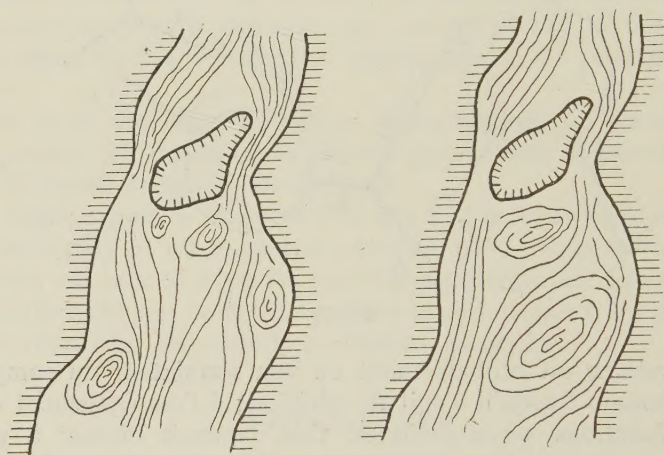


FIG. 2. — Phénomène de non commutativité apparaissant dans le lit d'une rivière quelconque de forme dissymétrique selon que l'une ou l'autre passe a été obstruée momentanément.

« M. Camichel a exécuté une série de recherches... sur le bar- « rage de Vives-Eaux près de Melun ... ; la constitution du barrage « composé de soixante quatorze hausses mobiles permet de réaliser « toutes les combinaisons possibles. On délimite dans l'ouvrage une « zone centrale dans laquelle la veine liquide offre deux configura- « tions différentes ; à droite et à gauche de cette zone demeurent, « par contre, deux zones latérales pour laquelle une seule solution

« est possible pour la direction de la veine (fig. 3). Le choix de la
 « solution dans la zone centrale dépend de l'ordre dans lequel les
 « vannes sont ouvertes, mais bien plus s'il y a deux veines liquides ;
 « si les vannes se trouvaient chacune à la limite exacte de la zone
 « centrale et de la zone latérale qui la concerne, l'attraction des
 « rives pourrait équilibrer l'attraction mutuelle des veines et l'on
 « obtiendrait ainsi, soit la divergence des veines, soit leur conver-
 « gence avec *indétermination* (on peut obtenir chacune des trois solu-
 « tions par différents procédés). »

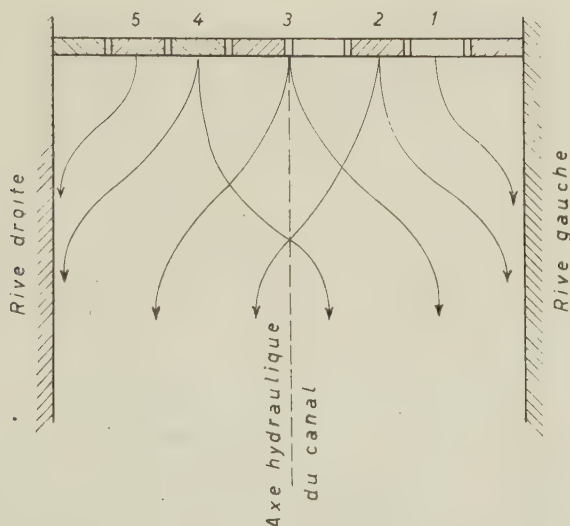


FIG. 3. — Multiplicité des solutions obtenues par déplacement d'une passe le long d'un barrage.

Ces exemples figurent dans ce paragraphe des multistats série car il est fort probable que les régulations se font en chaîne, « a tergo ».

MULTISTAT PARALLÈLE

En reprenant le schéma de base du feedback, on voit qu'il est fondé sur la détection d'une propriété particulière choisie, bien définie, de l'effet du système. Or cet effet est global ; il a généralement plusieurs propriétés. La grandeur de la propriété choisie est comparée à une grandeur de référence de même espèce (si celle-ci est fixe, il s'agit d'un feedback ; si elle est variable, c'est un servo-

mécanisme). Par exemple, dans un laminoir, l'effet est la tôle ; la propriété mesurée est l'épaisseur de cette tôle, mais celle-ci a d'autres propriétés : sa température, sa couleur, sa conductivité, sa longueur, son prix de revient, etc. Il ne semble pas que l'on ait songé à régler des mécanismes par feedback de plusieurs propriétés d'un même effet global, étant bien entendu que ces propriétés seraient différentes (le mot qualité pourrait paraître plus clair, mais il réveillerait la vieille controverse médiévale du « réalisme »).

On voit immédiatement que ces systèmes à feedbacks multiples sont de deux types.

L'un sans intérêt apparent : il correspond au cas où les différentes propriétés choisies évoluent selon la même fonction. La régulation se fait selon une propriété moyenne « imaginaire ».

Un second type, au contraire, est plus intéressant : ici, les propriétés choisies varient selon des fonctions différentes (linéaire, sinusoïdale, exponentielle, scalaire, etc.). Évidemment, pour un technicien de la régulation, cela paraît insensé, mais pour un familier des phénomènes complexes de la biologie ou de la sociologie, cela évoque des processus familiers et il serait même intéressant de vérifier si un tel schéma ne convient pas à certains phénomènes corpusculaires.

Un tel système, sans être difficile à réaliser, engendre cependant quelques complications : il faut trouver des propriétés qui varient selon des fonctions différentes, des capteurs qui conviennent, ainsi que des messages appropriés. On peut plus simplement, réaliser un bon modèle de ces simulateurs : il suffit de ne détecter qu'une seule propriété de l'effet global, la tension, par exemple, dans un système électrique. Cette tension peut être appliquée à un certain nombre de circuits qui simuleront les fonctions de variation d'autres propriétés, de propriétés imaginaires même (circuits à fonctions sinusoïdale, exponentielle, à relaxation, etc.). Le message en feedback de chaque circuit simule valablement la variation que pourraient avoir différentes propriétés en fonction de la variation d'un effet global. Il s'agit bien d'un système à feedbacks sur propriétés multiples. Il dispose de plusieurs niveaux de stabilité, avec régulation homeostatique à l'intérieur d'une plage autour de chaque niveau de stabilité, à la limite saut à un autre type de stabilité, et possibilité pour un même groupe de valeurs des facteurs à l'entrée d'avoir un effet équilibré à des niveaux différents. Voici le schéma de principe d'un tel système (fig. 4). Sur les lignes de feedback figurent des courbes de réponses imaginaires.

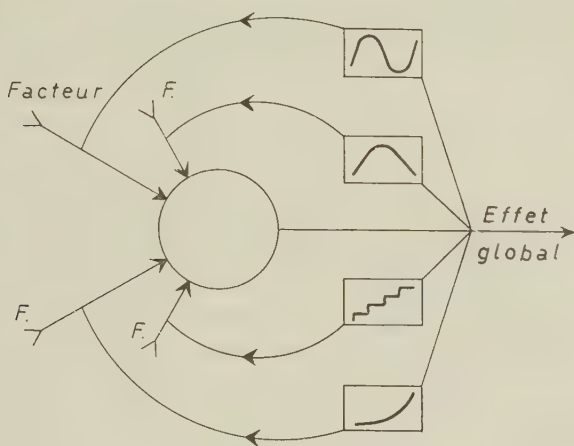


FIG. 4.

De tels systèmes présentent l'originalité de s'équilibrer non par annulation du message rétroactif différentiel, mais par équilibration réciproque des corrections des facteurs par les messages rétroactifs. Ces systèmes sont donc en équilibre alors que les feedbacks ne sont pas nuls ; on imagine aisément que ces feedbacks multiples ont plusieurs moyens de s'équilibrer. Il faut aussi ne pas perdre de vue que chaque facteur peut varier isolément et que le système de régulation ne peut être assimilé à un seul feedback répondant à la fonction résultant d'une combinaison des fonctions de variation de chaque propriété. On peut donc s'attendre à avoir, en expérimentant toutes les variétés possibles, soit des systèmes avec quelques rares points d'équilibre, soit des systèmes avec des points d'équilibre de plus en plus nombreux jusqu'à donner l'illusion du continu. Il est probable, d'ailleurs, que dans les systèmes très complexes de ce type comme les systèmes biologiques, on a de même qu'avec la machine S 4, à côté d'équilibres stables, des successions d'états d'équilibre se succédant spontanément à des rythmes divers, passant périodiquement ou non par les mêmes valeurs. Il ne s'agit pas là d'un pompage au sens vrai du terme, mais de restructuration constante. Il est possible que l'on trouve là le modèle des cycles en biologie et que la caractéristique des systèmes biologiques soit justement de n'avoir pas d'équilibre statique, mais, étant hors des conditions de stabilité des systèmes asservis, de présenter cet aspect particulier de recherche constante d'un équilibre toujours compromis. Nous n'allons pas jusqu'à affirmer que la vie

est suspendue quand les critères de Nyquist sont satisfaits, ce qui reviendrait à dire que la vie est une lutte *contre* un certain type d'homeostasie, mais il peut y avoir là matière à préciser une notion de domaine.

* * *

Voici donc les deux systèmes multistatistiques actuellement connus. Il est évident qu'ils peuvent être combinés. C'est un tel mécanisme qui, dans l'appareil S 5 qui renaît des cendres de S 4, va mesurer le coefficient de satisfaction.

De tels systèmes évoquent tout naturellement les phénomènes de régulations biologiques. Dans celles-ci intervient simultanément un nombre important de métabolites, donc de régulations (nous ne voulons pas dire que tel métabolite est « destiné » à assurer telle régulation, tel autre à être excrété ; pour nous, il se passe simplement ceci que chaque métabolite se trouve avoir des influences innombrables). Les représentations analytiques de tels phénomènes ne peuvent qu'être inexactes puisqu'elles ne sont pas récursives. La proposition de Laborit ⁽¹⁾ d'exprimer la biologie en modèles dialectiques cybernétiques est profondément valable. Nous sommes même fondés à penser que ces modèles dialectiques seront bientôt insuffisants, et qu'il faudra réellement « écrire » la physiologie en circuits électroniques de même qu'il a fallu peu à peu substituer les langages mathématiques ou logiques au discours classique dans la description de certains phénomènes. Il est très probable que des propriétés encore inconnues des systèmes complexes pourront être ainsi révélées.

Dès maintenant, par exemple, on s'aperçoit que, dans la simulation des systèmes biologiques, il n'y a pas intérêt à ce que la régulation homeostatique soit très puissante car elle rend inutile la fonction de modification des buts ; l'homeostat électronique (sans inertie) est insensible à la contingence, aucune information ne le fait varier, elle est instantanément étouffée, la machine devient « schizophrène ». Il faut donc, dans de telles constructions, équilibrer harmonieusement les facultés de régulation et celles de novation. Cela revient à redire, qu'en physiologie et en psychophysiologie, l'homeostasie n'est pas la fonction déterminante. Dans le système de pensée, elle est la gardienne vigilante qui interdit aux informations parasites de troubler le fonctionnement céré-

⁽¹⁾ LABORIT H. et WEBER, B., Presse médicale, n° 79, 12 nov., 1958.

bral. De cette façon, les informations réellement « signifiantes » gardent toute leur valeur et voient leurs effets s'épanouir sans contrainte. Cette suppression du bruit de fond pourrait s'appeler « homeostasie informationnelle ».

Enfin, l'étude des systèmes multistatistiques parallèles paraît remettre en question la notion de finalité absolue. « Jamais un mécanisme en rétroaction négative ne tendra à donner à ses messages une valeur fixe différente de zéro » (De Latil, *La pensée artificielle*). Pourtant ici nous nous trouvons en présence de systèmes qui, au contraire, ne sont en équilibre que quand leurs feedbacks transmettent des messages non nuls de correction des facteurs. L'équilibre global obtenu est *dynamique* ; il s'obtient par l'annulation réciproque des écarts que présente chaque facteur avec la valeur qu'il prendrait s'il était seul régulé dans le système c'est-à-dire la valeur pour laquelle le message en feedback est annulé, ou plutôt, pour être plus précis, par l'annulation réciproque des actions que ces écarts ont sur l'effet global.

ADDENDUM

LES PARA-RÉGULATIONS

L'analyse fine de divers schémas biologiques nous a conduit à isoler un nouveau type de régulation. Nous connaissons depuis longtemps la parenté qui existe entre les deux types classiques de rétroaction : servo-mécanismes et feedbacks. Le second est à référence fixe et son efficacité est de fixer l'effet global de l'effecteur qu'il contrôle. Dans le premier, au contraire, la valeur de référence est commandée de l'extérieur et l'efficacité est de moduler l'effet global grâce à cette commande.

Remarquons que, dans ce dernier cas, c'est « l'interprétation » du message en retour au niveau du capteur qui intervient pour fixer à tout moment l'effet global. Nous pouvons même nous demander si ce n'est pas à ce point exact que nous assistons à l'articulation de l'information « sélective » c'est-à-dire du message selon la théorie de l'information, avec l'information « sémantique », c'est-à-dire l'information signifiante dont la cybernétique n'a pu, jusqu'ici, aborder la théorie. En effet, dans un servo-mécanisme, un même message en retour, porteur du même nombre de « bits », prendra une signification différente selon la façon dont il sera accueilli par le comparateur. Il pourra, pour la régulation de la machine, vouloir dire, selon les moments : juste, trop ou trop peu. Il ne s'agit plus de correspondance bi-univoque entre le message et le comparateur,

mais d'une *interprétation*. Le message n'est plus accueilli par un « code » rigide mais par quelque chose qui est en reconstruction constante, véritable schéma de « dictionnaire » ou mieux de « langue », qui donne au message une signification variable. Mais ceci n'est qu'une incidente.

Le schéma (fig. 5) montre qu'il y a un autre moyen de moduler par rétroaction l'effet d'un système. On obtient, de cette façon, exactement les effets d'un servo-mécanisme alors que le principe est tout à fait différent. Il est probable qu'en technologie, de tels systèmes doivent se retrouver sous le nom de servo-mécanisme. En tout cas, en biologie, ils sont très fréquents.

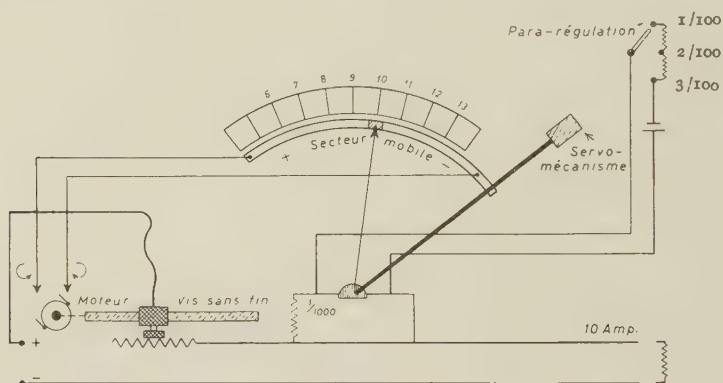


FIG. 5.

Décrivons le dispositif.

Nous désirons créer en un point d'un circuit à courant continu et tension constante (pour simplifier), un débit réglé à 10 ampères. Le facteur de réglage choisi est un rhéostat en série dont le curseur est commandé par une vis sans fin, mue par un moteur susceptible de tourner dans les deux sens. La rotation dans un sens augmentera l'ampérage, l'autre le diminuera. Cette intensité est mesurée dans un ampèremètre débitant le millième du courant principal. Cet ampèremètre porte, sous son échelle graduée, un secteur mobile. Ce secteur, balayé par l'aiguille de l'ampèremètre, porte une zone centrale neutre, étroite, et de part et d'autre de celle-ci, deux zones actives dont chacune, sous l'influence de l'aiguille de l'ampèremètre, commande la rotation du moteur de rhéostat dans un sens ou dans l'autre (grâce à un circuit auxiliaire). On réalise ainsi aisément une régulation en constance.

A — Si le secteur est fixe, zone neutre face à la graduation 10 ampères, on voit aisément comment le débit se règle à 10 ampères. C'est le feedback classique.

B — Si, au contraire, on mobilise le secteur de façon à porter successivement la zone neutre face aux graduations 10, 6, 4, 13, etc... on voit également que le débit est modulé selon les mêmes valeurs. C'est le servo-mécanisme classique.

C — Mais, maintenant, revenant à la situation A (régulation fixe), amenons, de l'extérieur, un courant auxiliaire de 1, 2 ou 3 centièmes d'ampère (on pourrait opérer avec des messages encore plus ténus) aux bornes de l'ampèremètre (dans le même sens que le courant principal dérivé pour simplifier l'exposé). L'ampèremètre va débiter 13 centièmes d'ampère et tout le système de régulation se comportera comme si le circuit principal débitait 13 ampères (sans qu'aucune référence, ni quoi que ce soit, soit modifié dans le comparateur). Le feedback va jouer pour ramener l'ampèremètre à débiter 10 centièmes d'ampère, ce qui ne correspondra qu'à 7 ampères effectifs dans le circuit principal. Ce nouveau débit sera strictement régulé. L'effet global du système va pouvoir être modulé, non pas en faisant tourner le secteur par un moyen mécanique ou électromécanique quelconque, mais en insérant exactement, à un endroit privilégié, une information aussi ténue que l'on veut. C'est en « trompant » le comparateur que l'on aura obtenu à bien peu de frais un effet de servo-mécanisme.

Un tel schéma pourrait s'appeler une para-régulation. Il est évident qu'au lieu d'être appliqué à un feedback, il peut se surajouter à un servo-mécanisme (cas fréquent en biologie).

Tout cela n'est pas pur byzantinisme. On retrouve fréquemment ces para-régulations dans les systèmes vivants ; elles font fonction de servo-mécanisme sans intéresser la structure propre des comparateurs (baro-récepteurs, chémo-récepteurs etc...) et cela d'une façon bien plus économique. C'est après avoir isolé de telles commandes⁽¹⁾ que nous avons remarqué que la plupart des servo-mécanismes biologiques n'agissaient pas sur le système comparateur, mais modulaient le message *en amont de celui-ci*.

Par exemple, Laborit⁽²⁾ a montré que la cellule vivante était

(1) SAUVAN J., *Physiologie cybernétique*. Presse Médicale, n° 16, 28 avril 1959.

(2) LABORIT H. et WEBER B., *Intérêt de l'application aux régulations physiologiques d'un mode de représentation cybernétique*. Presse Médicale, n° 79, 12 novembre 1958.

en autorégulation, du fait de la polarisation de sa « membrane ». Celle-ci laisse filtrer vers l'intérieur les aliments cellulaires selon son degré de polarisation, cette polarisation étant elle-même le résultat de la transformation de ces aliments par la cellule. Mais il y a des facteurs de polarisation extra-cellulaire qui modifient la perméabilité de la membrane, donc la quantité de nourriture de la cellule, donc son métabolisme, etc... C'est ce que j'avais assimilé ⁽¹⁾ à un schéma de servo-mécanisme. En réalité, c'est une para-régulation puisque la perméabilité cellulaire reste conditionnée exactement de la même façon par la polarisation ; *la référence n'a pas changé*.

Les schémas biologiques sont, d'ailleurs, très difficiles à établir car on ne sait absolument pas pourquoi l'« organe a été fait ». On ignore sa finalité dans le sens classique. Cela crée des difficultés d'exposition et complique les schémas de corrélation. En effet, un système régulé pour lequel on a choisi comme message rétro-actif, une propriété de l'effet, différente de la propriété à réguler (cas d'une machine à charge variable contrôlée par un régulateur de Watt), pose des problèmes très complexes. Tout, au contraire, devient simple si l'on adopte la règle suivante : *la finalité d'un système est la valeur que prend celle des propriétés de l'effet qui fournit le message de régulation*.

Si l'on veut définir la finalité d'un système multistatique, on peut dire : *la finalité d'un système multistatique est le domaine de la fonction qui lie les propriétés de l'effet qui fournissent les messages de régulation*.

Nota. — On trouve fréquemment utilisé à une autre fin ce moyen d'un « message parasite » ayant pour objet d'annuler à une valeur différente le message différentiel d'un système en rétroaction. On l'utilise pour « freiner » l'action d'un feedback qui risquerait d'être trop efficace, de faire dépasser le point d'équilibre, donc de faire pomper le système. Il n'est plus question ici d'agir comme servo-mécanisme mais simplement d'arrêter plus tôt une action régulatrice de manière à ce que l'inertie du système n'entraîne pas la correction au delà de la valeur nécessaire. Il s'agit dans ce cas du schéma que De Latil présente dans *La pensée artificielle* comme un contre-feedback de régulation plus fine (schéma p. 65). Il ne s'agit pas de cela ici mais d'un dispositif amortisseur progressif.

(1) SAUVAN J., *Physiologie cybernétique*. Presse Médicale, n° 16, 28 avril 1959.

Ceci illustre l'importante remarque de Couffignal sur les différences entre technique et cybernétique : alors que la première tend à faire réaliser le plus grand nombre possible de fonctions par la même pièce, par le même support, la cybernétique, au contraire, a comme tâche de distinguer soigneusement chaque fonction d'un système, soit qu'un seul support assume plusieurs fonctions, soit que plusieurs supports assument la même fonction.

A self organizing classification system

by B. L. M. CHAPMAN,

University of Bristol

One of the most impressive aspects of a study of the nervous system of man is the high degree of organization which must exist to allow him to behave purposefully and effectively despite the multitude of stimuli which intrude on his system and the complexity of mechanical movement involved in the simplest of muscular actions. The key to this problem of organization lies in the way the information derived from the stimuli is processed and used. It is imperative that the information is sorted to minimize all forms of redundancy so that the central coordinating mechanism of the brain is only asked to notice significant changes in the state of the environment instead of being taxed with trivial data which remain constant. A familiar and striking example of this process is the way in which one can be reading a book and quite suddenly become aware that a clock has stopped ticking.

One way in which information can be "compressed", so to speak, is by classifying it. A special and very important case of classification is found in language where a possibly complex situation or object is represented by a noun or adjective. The words, *chair*, *table*, *square*, *round*, *Bill's*, *Joe's*, all specify classes each of which may have very many members. By grouping the words, into a phrase, *Bill's round table*, we have specified an object. With the six words which appear above we can specify eight objects but if we care to add two more classes, *brown*, *red*, we can now specify sixteen objects.

It is possible, and indeed likely, that a classifying structure of this type exists in the animal nervous system in order that patterns or sets of stimuli may be recognized as groups. The class into which an observed event falls, determines its value to a particular organism. New events which do not belong to any familiar class must be treated as highly significant and regarded with caution.

The principle of operation of a logical system for sorting and counting the occurrence of patterns of input stimuli appears to have been first fully worked out by Uttley and is best described by him in a paper given at the Symposium on the Mechanization of thought processes at the National Physical Laboratory in 1958. The system he describes has a number of inputs, say n , and an output corresponding to each of the possible combinations of inputs, making a total of 2^n outputs. These outputs are followed by counters which register and store the number of times each pattern occurs, and whose output therefore gives a measure of the probability that the stimuli they represent will occur together. Uttley points out that if this type of classification system were found in the animal nervous system then the classification could not be complete since the number of inputs n is so large that the number of outputs would exceed the number of cells in the human brain by several orders of magnitude. Instead, he suggests that there could be a degree of randomness in the connections so that only some of the available input patterns are classified and the patterns of particular importance to the animal could be assured of being classified by hereditary connections.

This proposed system may be sufficient but I hope to show that it is not necessary. In the system which I shall describe, the counting process effectively takes place before classification is achieved and in this way outputs are provided only for patterns which do occur.

The cell required for this system may conveniently be thought of as a region bounded by a closed surface. Certain portions of its surface are shared by other identical cells, some of which can fire it and some of which can be fired by it, provided that further conditions of threshold are fulfilled. Every common boundary is considered to have a unidirectional property such that if cell i contributes to the firing of cell j by means of the boundary ij then cell j cannot assist in firing cell i by the same boundary but can do so if there exists a second boundary ji . Furthermore, associated with each common boundary, is a coupling factor which I shall call the ϕ value. This value is always smaller than unity and is a linear function of the coupling between cells, relative to the limiting coupling, unity, which just allows one cell only to fire its neighbour. There is a short time period within which the contributions of firing cells to the firing of another cell are additive, for the firing of a cell is considered to be represented by a discontinuous rise of some parameter p from zero to one, followed by an exponential decay

$$p = \exp.-k (t-t_0) H \quad (1)$$

where t_0 is the instant of firing, k is an arbitrary constant and H is the Heaviside step function.

If several cells fire within a short time of one another the determination of whether or not the contingent cell will fire is made by summing the products ϕp for all the cells concerned. The condition for firing is then given by

$$1 \leq \sum_{r=0}^{\infty} H \phi_r \exp.-k (t-t_r) \quad (2)$$

where ϕ_r is the ϕ value of the r th cell and t_r is the instant of firing of that cell.

For example, if a cell s has parts of its surface in common with p, q, r and the ϕ values at the boundaries ps, qs, rs , are 0.4, 0.7, 0.2 respectively then, provided the timing is correct, s will fire when p and q or p, q and r fire but will not fire if p and r or q and r fire.

So far, although its form may be strange, this is also a good description of the behaviour of some of the cells in the brain of an animal. Now I shall make a postulate upon which the success of my system depends, but which is not at variance with current hypotheses on the growth of synaptic boutons in the central nervous system.

Whenever a cell fires and the expression $\sum_{r=0}^{\infty} H \phi_r \exp.-k (t-t_r)$ exceeds unity by more than a small quantity then the ϕ values of all cells are lowered, but the ϕ values of cells which contributed to the firing are lowered less than those of cells which did not contribute.

I shall now show that for a group of cells with these properties arranged in the following simple configuration the system is necessarily self organizing.

Consider now a group of n of these cells representing inputs. By this rather vague term I mean that they may be simple stimuli from, say, the individual receptors of the retina of the eye or more complex groups of stimuli representing colour, smell, and touch, or even concepts such as shape and size.

Clearly for a complete classification we should require 2^n outputs of which we shall suppose only m are ever likely to be used during the time span of this particular part of the system. On this assumption we will only provide m output cells and allow each input to be connected to every output cell. This state I shall refer to as fully

connected. Initially all the ϕ values are at or around unity although it will shortly be clear that their exact value is of little importance. Suppose now that a pattern of stimuli is applied to the input cells and causes them to fire. At first, all the outputs will fire giving a meaningless response. However, as the ϕ values fall, a stage will be reached when all the outputs only just fire.

It is fair to say that some form of learning has taken place within the system for it is easily seen that a small change of the applied pattern, unless this change is the mere addition of more stimuli, will result in the pattern being unable to fire any output. This situation is rather a special case in which the system has only learned to recognize one pattern.

It may not be very clear that if during the learning period we display a number of different patterns then in certain circumstances there will be a tendency for the outputs to become fairly evenly allocated to the recognition of the different patterns.

In order to see this we will consider the case of two patterns displayed alternately on the inputs. For convenience, let us take a system with six inputs designated by the letters a, b, c, d, e, f , and let us suppose that the two patterns are a, b, c, e and $\bar{a}, \bar{b}, \bar{d}, \bar{f}$. At some point in the system the two patterns will be competing for the same output cell and because of the defined characteristics of the cell they cannot cohabit the same output.

Each time the first pattern is fired, its effect is to reduce the ϕ values of the cells a, b, c, e to values given by

$$\phi_1 = f(\phi_0) \quad (3)$$

and those of cells d, f to

$$\phi_1 = g(\phi_0) \quad (4)$$

where ϕ_0 and ϕ_1 are the initial and final values of ϕ respectively and $f()$ and $g()$ are functions of ϕ .

A similar action takes place when the second pattern is fired. Now after several firings, say $2r$, the cells a, b will have ϕ values given by

$$\phi_{2r} = f^{2r}(\phi_0) \quad (5)$$

and those of cells c, d, e, f by

$$\phi_{2r} = f^r g^r(\phi_0) \quad (6)$$

Although I have not defined the functions $f()$ and $g()$ I have said that $g()$ reduces ϕ by more than $f()$. Hence ϕ_{2r} as applied

to cells c, d, e, f is smaller than that applied to a, b , but how much smaller depends on the particular functions.

For simplicity let us assume that the functions are of the form

$$f(\phi) = k\phi \quad (7)$$

$$g(\phi) = k'\phi \quad (8)$$

where k and k' are fractional constants.

The ratio between the two sets of values of ϕ for the two groups of cells is now $(k/k')^r$. Since r can be very large then clearly the ratio k/k' is very critical to the behaviour of the system. This being so, it will be wise at this stage to consider at least two separate cases for different values of k/k' .

First let us consider the case where k/k' is very nearly unity. The two different patterns have been presented alternately to the system until such time as one pattern just reduces sufficiently the ϕ values of the cells which it does not include to prevent the other pattern from firing the output. From then onwards the pattern which achieved this win merely consolidates its position by adapting the output to classify it more accurately. Since, by definition, the ratio k/k' is almost unity, when the classification is complete, the ϕ values of the winning pattern will be almost equal. In the example given they will be around 0.25. Possibly a and b will be 0.3 and the remaining two will be 0.2.

An unfortunate aspect of this mode of operation is that the ϕ values of all elements not included in the winning pattern will be little different from those included in this pattern. While this is adequate to reject any new pattern having the same number of elements as the winning pattern, it does not preclude the possibility of a new pattern with a greater number of elements claiming the output for its own use.

In order to avoid this occurrence it might be wise to add a further condition to that stated in *italics* on page 154 and say that after classification is complete the classified pattern shall continue to reduce the ϕ values at boundaries between cells which it does not include and its output.

Which, of a group of equally frequent patterns, will win a particular output is determined by small random differences in the initial ϕ values at that output and so, in a large system the probability that any particular pattern will completely fail to win an output is very small.

The other extreme condition in which k/k' is large presents the rather interesting behaviour that the system never fully learns to

classify its inputs individually. Instead, it picks out features common to several of them and fires an output whenever one of these features is recognized. This is easily seen by again considering the equations (5) and (6) and their simplified version obtained by substituting equations (7) and (8) in them

$$\begin{aligned} \text{and} \quad \phi_{2r} &= k^{2r} \phi_0 & (9) \\ \phi_{2r} &= k' k'^r \phi_0 & (10) \end{aligned}$$

Now since k/k' is much greater than unity, when r exceeds, say ten, the right hand side of equation (10) becomes vanishingly small compared with the right hand side of equation (9). This means that in our earlier example the ϕ values of c, d, e, f would have become vanishingly small, leaving the small subset a, b to dominate the output.

Modification of these two ϕ values will continue until they are both 0.5. Clearly any pattern containing this subset a, b will now be recognized by this output as being familiar and in this restricted part of the system will be identified with the two teaching patterns.

Both of the two cases so far discussed have been "time independent" systems in that they can only cope with a fixed environment. The outputs adapt to classify this environment and any change in it cannot modify the system further. A more useful system which can cope with environmental changes is envisaged as having a stock of output cells which are continuously recruited. If the system is only required to classify recent events then it should be possible to cycle the output cells so that cells are being withdrawn from use at the same rate as they are being recruited. Indeed these modifications make clear the criterion to be observed in choosing a value for k or more generally $f(\phi)$, a point which I have hitherto carefully avoided. In a given time interval t during which patterns are displayed to the system, the frequency of occurrence of any particular pattern depends on the length of that interval. In other words if the interval between the time that a new cell is recruited and the time that it is fully adapted is too long then a transient pattern may find that its frequency of occurrence over this interval is too small compared with those of habitual patterns for it to win an output. The loss of a transient pattern might not be a bad thing if its importance were proportional to its time of appearance but it is frequently true that a very brief transient pattern is vital to the well being of the system whereas the habitual

patterns are of no significance. It would not be economic to count all signals on a system having a short learning time as habitual patterns are inevitably relearned and the rate of recruitment of cells would have to be astronomically large. A desirable arrangement might be to have available a range of outputs with learning times of differing lengths and to allot signals to them according to their significance. The criterion which gives a signal high significance may be, and in human experience often is, contained in a small subset of the signal which is familiar and which could therefore be recognized on a portion of the classification system which had already learned on the "k/k' large" scheme.

In many animals a few stimulus patterns appear to have high significance to the newly born who can have had no experience even of small subsets. One explanation of this is that some parts of the classification system are hereditary; the equivalent in the electronics system of older joints.

So far throughout this discussion I have implied that patterns received by the system are spatial though there is no fundamental reason why we should so restrict ourselves. The use of delays to convert a temporal sequence to a spatial array has been dealt with by many workers in this field and is well known.

I stated earlier in this paper that when I used the word input, I meant either a simple stimulus or a complex group of stimuli. Now I will go further and say that the system I have described is sufficiently general to be used at many different levels in the central controlling mechanism of an organism and that it is possible to stack the classifying networks in layers to build a much more versatile machine than could be achieved with a single large classifying net.

At the simple stimulus level a classifying net or growth net of this type could be used in a rather primitive auditory system for speech recognition, taking its inputs from a range of frequency filters and giving as output a range of phonemes.

A limited spread of temporal discrimination might have to be provided for consonants but the vowels could be received on a "time independent" system. The outputs of this layer would form the inputs to the next layer together with several delays for each phoneme. The output of this layer would be words, and it is interesting to note that this layer in fact stores the transition probabilities of Markoff table relating each incoming phoneme to the previous phoneme. The reason for this, is, as we discovered earlier,

patterns occurring most frequently adopt the greatest number of outputs from the new recruits.

Hence, the most probable word derived from a group of unclear phonemes will be that word which has adopted the most outputs to classify it. At this level the word can also be associated with visual or motor activity depending on whether it is a noun or a verb and even with a visual or aural image of the spelt word. Higher levels of classification may clearly be added to cope with sentences and the concepts associated with them. This brief schema is not intended to be a blueprint of a practical aural system but merely an example to illustrate the way in which these classifying networks may be used in an animal like organism.

I have been able to show that this type of logical system, with slight modifications may even be used for learning purposeful motor activity though the argument is somewhat tedious and would be out of place in this paper.

I have recently completed building an electronic model of the "growth net" principle and will now give a brief outline of its method of operation. Although the topology of information flow has been preserved the physical arrangement of cells is somewhat different from the theoretical description.

In practice the inputs consist of six switches which are operated manually and six lamps to indicate which inputs have been fired. The six outputs of the machine are more complex but consist essentially of pentode valves, each with a relay as its anode load. The firing of an output is indicated by the lighting of a lamp switched by the relay. It will be appreciated that the number of outputs is chosen quite arbitrarily and bears no relation to the number of inputs. In fact for complete classification of six inputs, sixty-four outputs would be required.

What I described earlier as a common boundary now takes the form of a moist fibre of cotton yarn connecting each input to the control grid of each pentode. When an input is fired a positive voltage is applied to the input end of the cotton fibre causing a current to flow through the moisture and through the grid leak to earth (fig. 1). Normally the resistance of the cotton fibre is several times that of the grid leak so that when several inputs are fired simultaneously the currents flowing in the fibres are almost independent of one another. But of course the current flowing in the grid leak is the sum of the currents in all fibres connected to it. Hence the change in grid voltage at an output cell produced by firing a pattern of inputs is dependent on the sum of the conduc-

tances of the fibres coming from firing inputs. By means of the output relay a relatively large current can be passed through the cotton fibre causing heating and evaporation of moisture with a consequent rise of electrical resistance.

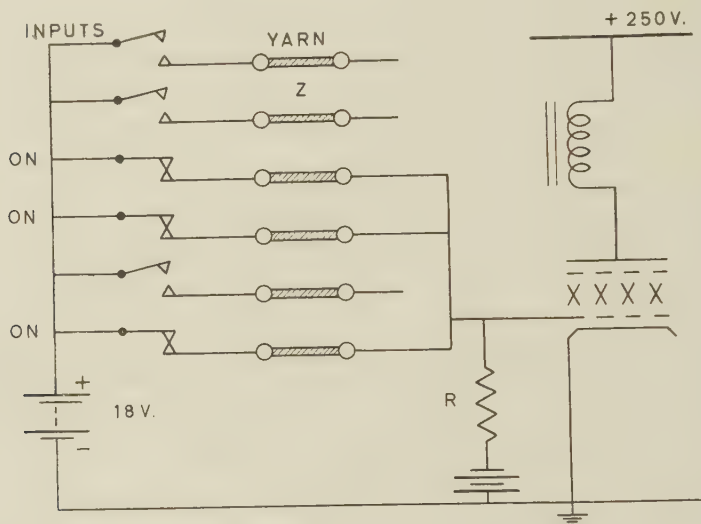


FIG. 1. — Functional diagram of part of the "growth net" prior to the firing of an output.

The use of moist cotton fibres for storage has considerably reduced the size of the machine from the original plan which was to have used condenser storage. By application of a hygroscopic agent such as glycerin to the fibres the memory time of the machine can be controlled.

At present the machine is working on the " k/k' large" system and a few trial experiments have shown that it is working as predicted by the logical treatment. This fact is trivial. I hope in the near future to reduce the complexity of the electronics still further, until it is possible to build a machine with a number of elements so large that its behaviour exceeds the range of accurate prediction.

Could this system I have described be a description of the operation of an animal brain? The answer to this question depends entirely on whether the condition I made in *italics* at the beginning of this paper is applicable to the growth of synaptic

knobs and until this is known, it is unsafe to speculate too far. However, the facts that my system is initially fully connected, or nearly so, and that its operation is not dependent on initial threshold values or accurate changes of them makes it very attractive as a proposed mirror of cerebral organization.

REFERENCES

- BEURLE, R. L., *Properties of a mass of cells capable of regenerating pulses*. R. R. E. Malvern Report, 1950.
- FRY, D. B. and DENES, P., *An analogue of the speech recognition process*. Symposium at National Physical Lab. on *Mechanization of thought processes*, 3-1 H. M. S. O., 1958.
- GEORGE, F. H., *Automation, cybernetics and society*. Leonard Hill (Books) Ltd, 1959.
- LADEFOGED, P., *The perception of speech*. 3-2 N. P. L. Symposium, 1958.
- TAYLOR, W. K., *Automatic control by visual signals*. 4-11 N. P. L. Symposium, 1958.
- UTTLEY, A. M., *Conditional probability computing in the nervous system*. 1-5 N. P. L. Symposium, 1958.

Essai d'interprétation du fonctionnement des cellules vivantes dans le cadre de la cybernétique quantique

par J. POLONSKY,

*Directeur technique du département « Études-Télévision »
de la Compagnie Générale de T. S. F. (Paris)*

IV. JUSTIFICATION DE L'HYPOTHÈSE SUR DES BASES PHYSIQUES ⁽¹⁾

Nous allons, dans la première partie de ce chapitre, établir les conditions générales nécessaires et suffisantes pour la transformation d'un système passif en source d'information.

Dans la seconde partie, nous essayerons d'appliquer ces conditions à un système biologique.

I. CONDITIONS NÉCESSAIRES ET SUFFISANTES POUR QU'UN SYSTÈME PASSIF SE TRANSFORME EN SOURCE D'INFORMATION

a) Méthode utilisée.

Nous allons utiliser dans cette étude la méthode analogique. En partant des générateurs d'information connus (électriques, acoustiques, etc.), nous allons essayer d'établir les conditions générales nécessaires à la transformation d'un système passif en système actif.

Les conditions d'amorçage et d'entretien d'oscillations concernent uniquement le support énergétique de l'information. La quantité d'information dépend de la structure ordonnée du système, et sa transmission s'effectue sous forme d'une modulation du signal formant support de l'information. Ces conditions peuvent être groupées en deux catégories :

(¹) La première partie de cet article a paru dans *Cybernetica* Vol. II, n° 2, 1959.

1° thermodynamiques ;

2° structurales.

Nous allons tout d'abord les établir sans faire intervenir la mécanique quantique ; les conditions quantiques seront précisées par la suite.

b) Conditions thermodynamiques.

Rappel d'équations classiques. — La loi de conservation de l'énergie et le deuxième postulat de Carnot généralisé s'expriment en thermodynamique classique (pour un système isolé et pour des transformations isothermes) par les relations

$$\Delta\left(\frac{G}{T} - \frac{H}{T} + S\right) = 0 \quad (5)$$

$$\Delta\left(-\frac{H}{T} + S\right) = -\frac{\Delta G}{T} \geq 0 \quad (6)$$

L'équation de départ étant

$$H = G + TS \quad (7)$$

H, enthalpie totale du système convertible en chaleur ;

G, énergie libre de Gibbs convertible en travail ;

ΔS , variation de l'entropie positive du système ;

T, température absolue.

1° — Introduction de l'énergie du support d'information dans les équations thermodynamiques.

α) Définition des entropies négatives.

Dans la relation (5), $\frac{G}{T}$ joue le rôle de la capacité énergétique d'ordre du système et se présente comme l'entropie négative totale du système. Par sa nature physique, l'information est également une capacité énergétique d'ordre et peut être assimilée à une entropie négative.

Posons donc

$$\frac{G}{T} = (N + I) \quad (8)$$

N représente la partie de l'entropie négative totale qui caractérise la capacité énergétique du système de transformer l'énergie potentielle interne = NT en travail ;

N sera dénommée la *néguentropie* (terme introduit par Brillouin) ;

I représente la partie de l'entropie négative totale qui caractérise la capacité ordonnée et cohérente du système *d'asservir des systèmes extérieurs en résonance avec lui, en vue de leur imposer des transformations ordonnées et cohérentes de leurs énergies potentielles en fonction du temps*. Ces transformations peuvent être considérables et hors de proportion avec l'énergie contenue dans l'information I ;

I sera dénommée l'*information* ;

IT est l'énergie du support de l'information.

L'annexe I donne plus de détails concernant les caractéristiques d'un signal informationnel.

β) *Définition des entropies positives.*

$$\left(-\frac{H}{T} + S\right) = S_i \quad (9)$$

S_i est l'entropie positive totale du système.

Posons

$$\Delta\left(-\frac{H}{T}\right) = \Delta J \quad (10)$$

J représente la partie de l'entropie positive qui caractérise la capacité du système de dégrader en chaleur l'énergie potentielle JT, sous l'effet des transformations ordonnées à l'intérieur du système (de NT et IT) ;

J sera dénommée l'*entropie Joule* ;

JT est l'énergie Joule ;

S représente la partie de l'entropie positive totale qui caractérise la capacité du système de dégrader en chaleur l'énergie potentielle ST ; cette dégradation est due aux collisions désordonnées à l'échelle atomique et moléculaire et aux émissions et absorptions statistiques, ayant lieu à l'intérieur du système.

Sur le plan informationnel, les fluctuations statistiques qui en

résultent n'ont aucune signification physique pour un récepteur donné. *Ces fluctuations venant de la source d'information ou engendrées dans le récepteur sont capables de brouiller l'action ordonnée de l'information ;*

S sera dénommé la *néguinformation* :

$$S = k \text{ Log } P_n \text{ (ergs /}^{\circ}\text{C)} \quad (11)$$

avec

k , constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-16}$ ergs / $^{\circ}\text{C}$)

P_n , nombre de complexions statistiques équiprobables dans le système.

Nota. — Du point de vue du brouillage de l'action d'asservissement de la source, la valeur de S à prendre en considération dépend de la bande passant du récepteur couplé à la source d'information, et du système de codage de l'information.

2° — Généralisation des équations thermodynamiques. — Remplaçons dans les relations (5) et (6) :

$$\frac{\Delta G}{T} \text{ par } \Delta(N + I) \text{ et } -\frac{\Delta H}{T} \text{ par } \Delta J$$

On obtient ainsi les deux équations thermodynamiques généralisées tenant compte de l'introduction de l'énergie potentielle du support de l'information.

Dans ces équations figurent les capacités énergétiques (en ergs par degré) toutes ramenées au facteur commun à la température absolue T :

$$\Delta(N + I + J + S)T = 0 \quad (12)$$

Pour $T \neq 0$, on peut écrire

$$\Delta(N + I + J + S) = 0 \quad (13)$$

et

$$\Delta(J + S) = -\Delta(N + I) \geq 0 \quad (14)$$

La relation (13) exprime la loi de conservation de l'énergie, tandis que la relation (14) exprime le deuxième postulat généralisé de Carnot.

c) Résumé des conditions générales nécessaires pour qu'un système passif puisse se transformer en source d'information.

Pour des systèmes à l'échelle macroscopique, il y a deux conditions d'amorçage d'oscillations et deux conditions permanentes nécessaires à l'entretien de ces oscillations (Pour la démonstration, voir l'Annexe II).

Nota. — Pour les systèmes obéissant à la mécanique quantique, des conditions supplémentaires s'ajoutent.

Les quatre conditions sont les suivantes :

Conditions d'amorçage :

$$\Delta N_{\text{amorçage}} = -(I + \Delta J + \Delta S) < 0 \quad (\text{A})$$

$$\frac{\Delta \bar{A}_r}{\Delta \bar{A}_o} = +1 \quad (\text{B})$$

Conditions d'entretien :

$$\Delta N_{\text{alimentation}} = (I_e + \Delta J + \Delta S) \quad (\text{C})$$

$$\Delta N_{\text{interne}} = -I_i \quad (\text{D})$$

$$I = I_e + I_i$$

Nota. — \bar{A}_i , \bar{A}_o , I_e et I_i sont définis dans les paragraphes qui suivent.

α) La première condition thermodynamique d'oscillations dans un système passif [relation (A)] peut s'énoncer : Un système passif ne peut devenir générateur d'information qu'en perdant à l'amorçage une certaine quantité de néguentropie. Celle-ci est égale à la somme de l'information créée et de l'accroissement de l'entropie positive totale du système.

β) La deuxième condition d'amorçage d'oscillations est une condition d'ordre structural [relation (B)] et peut s'énoncer : Pour qu'un système passif puisse devenir source d'information, il est nécessaire

que sa structure physique permette à une perturbation du signal support d'information $\Delta\bar{A}_o$ de se propager le long du système et de ramener à l'origine, un signal de réaction $\Delta\bar{A}_r$ égal en amplitude et en phase à la perturbation d'origine.

γ) La première condition d'entretien d'oscillations ou la deuxième condition thermodynamique [relation (C)] peut s'énoncer : Tout générateur d'information doit être alimenté en néguentropie par une source adaptée, extérieure au système pour compenser les pertes en information délivrée à la sortie $= I_e$ et l'accroissement de l'entropie positive du système.

δ) La deuxième condition d'entretien d'oscillations ou la troisième condition thermodynamique [relation (D)] s'énonce comme suit : Après l'amorçage d'oscillations, la source de néguentropie étant en fonctionnement, le système doit rester en équilibre thermodynamique avec une néguentropie diminuée $\Delta N_{interne} = -I_i$. Celle-ci sert au maintien d'un réservoir énergétique d'information I_i , solidaire du système et oscillant entre un état potentiel et un état cinétique. A l'arrêt des oscillations, I_i est restitué au système sous forme de néguentropie.

2. CONDITIONS IMPOSÉES PAR LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ⁽¹⁾

Comment se présentent les conditions d'amorçage et d'entretien d'oscillations dans un générateur moléculaire ?

a) États quantiques dans une molécule.

Dans une molécule, l'énergie interne est limitée à un certain nombre de niveaux quantifiés dénommés niveaux stationnaires d'énergie.

Ces différents niveaux sont liés aux caractéristiques des moments cinétiques, magnétiques et électriques des noyaux et des électrons du système soumis à des champs créés à l'intérieur de la molécule, ou venant de l'extérieur.

Les interactions de la molécule avec un champ électromagnétique ne sont possibles que s'il en résulte des échanges d'énergie par l'émission ou l'absorption des photons correspondant à des transitions quantiques de la molécule.

(1) L'objet de ce paragraphe est de donner un bref rappel des phénomènes quantiques dans une molécule oscillante.

La fréquence d'oscillations des photons est donnée par

$$\nu_{mn} = \frac{\Delta W_{mn}}{h} = \frac{W_m - W_n}{h}$$

W_n et W_m représentent deux niveaux quantifiés de la molécule et h est la constante de Planck.

Si ΔW_{mn} est exprimée en électrons-volts, on a la relation

$$\nu_{mn} \simeq \frac{\Delta W_{mn}}{4} 10^{15} \text{ c/s}$$

$$1 \text{ eV} \simeq 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ ergs}$$

Les énergies des rotations et des vibrations moléculaires correspondent respectivement à des transitions de 10^9 à 10^{11} c/s et de 10^{11} à 10^{13} c/s environ. Pour les transitions électroniques, l'énergie des transitions correspond à des fréquences de 10^{13} à 10^{16} c/s environ.

b) Interaction entre un champ électromagnétique et des microsystèmes.

Quand on soumet un ensemble de microsystèmes en équilibre statistique à un champ électromagnétique, une certaine énergie peut être prélevée sur le champ et être emmagasinée dans un certain nombre de microsystèmes. Ceux-ci retournent à leur état d'équilibre après une période T_1 , dénommée temps de relaxation du réseau par rapport à ces microsystèmes.

Il existe, par ailleurs, une deuxième cause de perturbation dans l'interaction entre un champ électromagnétique et un microsystème individuel. Celle-ci provient de l'intervention locale des microsystèmes voisins, modifiant la phase entre le champ électromagnétique et le microsystème individuel. La période T_2 est le temps de relaxation « transversale » entre le microsystème individuel et les microsystèmes voisins.

Si T_1 est grand, l'entropie positive du système est faible et inversement. La valeur de T_2 joue un rôle fondamental dans la cohérence de l'action du champ électromagnétique sur les microsystèmes; elle détermine la possibilité d'émissions induites des photons ou d'un amorçage d'oscillations cohérentes dans une molécule.

Enfin, il faut tenir compte des transitions spontanées donnant du « bruit » ou une information négative.

c) *Principe de fonctionnement d'un « maser ».*

Dans la plupart des molécules en équilibre thermodynamique statistique, le peuplement d'états quantiques à énergie élevée est plus faible que celui d'états à énergie plus réduite. Sans intervention extérieure, un tel système ne connaît que des émissions ou des absorptions statistiques. Si, par contre, par des moyens extérieurs appropriés (champ électrique ou magnétique par exemple), on provoque à l'intérieur de la molécule un surpeuplement des niveaux quantiques élevés, des transitions cohérentes entre niveaux d'énergie deviennent possibles. En particulier, si l'on excite les états quantiques surpeuplés par des photons dont la fréquence ν_{mn} est donnée par

$$\nu_{mn} = \frac{\Delta W_{mn}}{h} = \frac{W_m - W_n}{h}$$

et si W_m et W_n représentent deux états quantifiés de la molécule, un phénomène d'émission induite des photons apparaît sur la même fréquence ν_{mn} ; la molécule fonctionne comme amplificateur si le nombre de photons émis est supérieur à celui absorbé par la molécule.

Si l'on pousse le surpeuplement des niveaux quantiques à énergie élevée au-delà d'un certain taux, la molécule peut émettre des photons sur la fréquence ν_{mn} sans être excitée par des photons extérieurs; la molécule fonctionne alors comme un auto-oscillateur.

La condition de réaction entre le champ électromagnétique et un microsystème oscillant se déduit de la relation :

$$\Psi = \sum_j a_j \Psi_j \quad (B')$$

où

$$\Psi = a_1 \Psi_1 + a_2 \Psi_2 + \dots + a_n \Psi_n$$

Ψ , fonction d'onde du microsystème considéré ;

Ψ_j , fonction d'onde d'un état quantique du microsystème d'indice j ;

a_j est un coefficient complexe se rattachant à Ψ_j .

On connaît actuellement un certain nombre de molécules capables de fonctionner comme amplificateurs ou comme oscillateurs qu'on

nomme « masers » (molécules d'ammoniaque et certains cristaux paramagnétiques en particulier) ⁽¹⁾.

Nota. — Un maser peut fonctionner par transitions entre deux états ou entre plusieurs états quantifiés. Par exemple si W_1 , W_2 et W_3 sont trois états quantiques de la molécule, l'absorption d'un photon d'énergie $(W_3 - W_1)$ peut provoquer l'émission des photons, sur les fréquences ν_{32} et ν_{21} correspondant aux transitions énergétiques $(W_3 - W_2)$ et $W_2 - W_1$.

d) Oscillateur ou amplificateur macromoléculaire ou « polymaser ».

Nous allons dénommer « polymaser » un système capable d'osciller ou d'amplifier soit simultanément, soit successivement sur plusieurs fréquences, suivant une certaine loi en fonction du temps.

Supposons un ensemble de microsystemes formant la macromolécule auquel on appliquerait de l'extérieur une certaine néguentropie (sous forme de champs électriques ou magnétiques par exemple) capable de créer un surpeuplement des divers niveaux quantiques à énergie élevée de manière qu'en excitant la molécule par des photons dont les énergies correspondent aux différentes transitions quantiques des niveaux surpeuplés, il puisse y avoir des émissions induites.

Si les conditions structurales de la molécule sont favorables à la réaction entre le champ électromagnétique avec les microsystemes, dont les transitions sont en résonance avec les photons incidents, le système peut fonctionner comme amplificateur sur plusieurs fréquences discrètes (simultanément ou avec répartition dans le temps suivant le temps de relaxation longitudinale T_{1n} du réseau moléculaire par rapport aux microsystemes, d'une part, et le temps de relaxation transversale T_{2n} d'un microsysteme individuel indice n par rapport aux microsystemes voisins).

Un tel « polymaser » pourrait fonctionner comme auto-oscillateur sur plusieurs fréquences, si les conditions de néguentropie et d'interaction sont remplies pour ces diverses fréquences (voir l'Addenda).

⁽¹⁾ WITTKE, J. P., *Proc. Inst. Radio Engrs*, Mars 1957 et WEIBEL, G. E., *The Sylvania Technologist*, Octobre 1957 et Janvier 1958.

3. APPLICATION DE LA THÉORIE DES GÉNÉRATEURS D'INFORMATION A LA BIOLOGIE

Nous avons vu que les quatre conditions imposées à la transformation d'un système passif en générateur d'information (Ch. IV, 1) font intervenir la structure et les capacités énergétiques du système. Examinons ces caractéristiques dans le cas des macromolécules dont sont formés les systèmes biologiques. Nous n'avons pas la prétention de pouvoir aborder ce domaine par le calcul, trop de facteurs importants nous étant, hélas, inconnus. Nous allons nous limiter à une analyse qualitative.

a) Propriétés thermodynamiques des macromolécules biologiques.

Quel sens physique peut-on attribuer aux capacités énergétiques N, I, J et S dans le cas des macromolécules ?

Les définitions données à ces termes, précédemment (ch. IV, 1, b) restent évidemment valables. Toutefois, comme il s'agit d'une application particulière à des molécules chimiques, on pourrait mieux préciser leur nature.

α) Dans une molécule en équilibre thermodynamique, la répartition de l'énergie interne dans les différents niveaux quantiques est bien définie.

Si par contre, la molécule s'écarte de cette distribution d'énergie (par absorption d'une énergie extérieure, par exemple) et qu'on se trouve ainsi en présence d'un surpeuplement des niveaux quantiques à énergie élevée, des forces internes apparaissent à l'intérieur de la molécule tendant à ramener la distribution de l'énergie à son état initial.

Ce résultat peut être obtenu par différents moyens :

— *Par des transformations internes* sous forme de travail chimique, électrique ou mécanique, permettant au système de perdre une partie de l'énergie potentielle à entropie négative en chaleur, c'est-à-dire en accroissement de l'entropie positive du système.

— *Par la perte de l'énergie en excès par voie de rayonnement des photons* suivant une loi cohérente en rapport avec la structure interne de la molécule.

— *Par diffusion de l'énergie en excès à travers le réseau moléculaire* ou *par des émissions statistiques* non cohérentes amenant

également une diminution de l'entropie négative et l'accroissement de l'entropie positive de la molécule.

β) Les quatre capacités énergétiques de la molécule sont en rapport avec ces trois modes de transformations :

— *La néguentropie* N caractérise la capacité de la molécule d'utiliser les forces ou les contraintes internes pour effectuer un travail chimique, électrique ou mécanique, par des transformations internes.

— *L'information* I caractérise la capacité de la molécule d'utiliser les forces internes cohérentes pour émettre des « messages ordonnés ». Ceux-ci permettent à la source d'information d'asservir des systèmes extérieurs et de leur faire exécuter des transformations considérables et hors de proportion avec l'énergie contenue dans les messages reçus.

Ce résultat est obtenu grâce aux phénomènes de résonance existant entre l'énergie quantifiée contenue dans les messages et les états quantiques des effecteurs auxquels se trouvent appliqués ces messages, d'une part, et entre les codes (ou les séquences de ces messages) de la source et de ces mêmes effecteurs d'autre part.

Soit ν_{mni} la fréquence des photons émis, l'énergie contenue dans un message est $n_i h \nu_{mni}$ (n_i , nombre de photons émis à la fréquence ν_{mni} au cours du message i).

L'énergie totale émise ou absorbée par unité de temps est

$$W = \frac{I}{\theta_r} \sum_1^M n_i h \nu_{mni} = IT \text{ (ergs/s)}$$

n_i , nombre de photons dans le message d'indice i ;

ν_{mni} , fréquence de photons correspondant au support du message d'indice i ;

M , nombre total de messages pendant θ_r ;

T , température absolue ;

I , capacité énergétique d'information de la source ;

θ_r , période de répétition.

— *L'entropie positive Joule*, désignée sous la lettre J , est la capa-

cité de la molécule de dissiper en chaleur une partie de l'énergie potentielle égale à JT au cours des transformations ordonnées à l'intérieur du système.

Les transformations ordonnées sont celles qui sont liées au travail effectué grâce aux variations de la néguentropie N et de l'émission de l'information I mentionnées ci-dessus.

— *L'entropie positive des fluctuations statistiques S , dénommée dans l'étude, la néginformation*, caractérise la capacité du système de dissiper sous forme de chaleur une partie de l'énergie potentielle grâce aux collisions désordonnées des particules élémentaires en mouvement dans la molécule et grâce aux émissions et absorptions statistiques des photons.

b) Analyse de l'aptitude des macromolécules biologiques d'émettre ou de capter des informations (aspects thermodynamique et structural).

Compte tenu des définitions données au ch IV, 1, b, des quatre capacités énergétiques N , I , J et S , on peut analyser le comportement chimique d'une macromolécule en fonction de la variation de ces quatre paramètres à la lumière du deuxième postulat généralisé de Carnot [Pour la démonstration, voir ch IV, 1, b, relation (14)].

$$\Delta(N + I) = -\Delta(J + S) \leq 0$$

Compte tenu de nos connaissances expérimentales en biochimie, on peut déduire du tableau I que du point de vue thermodynamique :

— *les protéines*, y compris les enzymes répondent au cas

$$\Delta(N + I) = -\Delta(J + S) = 0$$

et effectuent des réactions réversibles.

— *les acides nucléiques* ADN et ARN répondraient aux conditions

$$\Delta(N + I) \geq 0 \quad \text{et} \quad \Delta(J + S) \leq 0$$

La différence essentielle dans le comportement cybernétique des ADN et des ARN pourrait provenir de la différence existant entre leurs $\varepsilon = \Delta(N + I)$ et des fonctions d'onde de leurs microsystèmes exprimées par $\psi_a = \sum a_j \psi_j$.

TABLEAU I. — *Stabilité et réactivité chimiques des macromolécules et leur tendance à se transformer en sources d'information.*

Si dans la molécule. il y a tendance à ↓	La stabilité chimique de la molécule est ↓	La réactivité spécifique comme servo-mécanisme chimique (comme catalyseur) est ↓	La capacité d'imposer à d'autres molécules des ré- actions spécifiques comme source d'information est ↓
$\Delta(N + I) < 0$ ou $\Delta(J + S) > 0 \dots$	Mauvaise	Faible (grande réactivité non spécifique)	Nulle
$\Delta(N + I) = 0$ ou $\Delta(J + S) = 0 \dots$	Précaire (réactions réversibles)	Bonne (si la structure de l'effec- teur est en résonance avec celle de la source d'infor- mation)	Bonne (comme source secondaire d'information)
$\Delta(N + I) > 0$ ou $\Delta(J + S) < 0 \dots$	Bonne (le postulat de Carnot ne serait pas respecté)	Faible (faible réactivité en général)	Très grande (comme source secondaire et tend à de- venir une source primaire)

1° Il n'est pas impossible que la stabilité chimique relative des ADN par rapport à celle des ARN, soit en rapport avec le fait que $\epsilon_{\text{ADN}} > \epsilon_{\text{ARN}}$.

En effet, la structure complexe et rigide, d'une part, et l'ordre et la variété dans la répartition des bases aminées riches en énergie de résonance, d'autre part, donnent respectivement aux ADN une néguentropie N et une entropie négative d'information I élevées.

2° Par ailleurs, la structure électronique et géométrique des ADN (liaisons conjuguées, ponts hydrogène et deux hélices couplées entre elles) pourraient offrir des conditions favorables, du point de vue de la réaction, entre le champ électromagnétique et les divers microsystemes formant un ADN.

Il n'est pas exclu, toutefois, que dans certaines conditions, des ARN puissent acquérir toutes les qualités nécessaires pour se transformer de sources secondaires en sources primaires analogues aux ADN. A titre d'exemple, citons les cas du virus par rapport à la cellule hôte et peut-être du « cancer » à la base d'endogenèse virale par malformation de certains ARN du cytoplasme (ch. III, 8).

V. CONCLUSIONS

Dans les conclusions des chapitres II et III (ch. II, 5 et III, 9) nous avons résumé les idées essentielles qui nous ont semblé se dégager de cette étude. Nous demandons au lecteur de bien vouloir s'y reporter.

Toutefois au terme de cet exposé, nous voudrions faire les remarques suivantes :

1. Il n'est pas interdit de penser que, si certaines macromolécules pouvaient satisfaire aux conditions précisées ci-après, elles seraient aptes à fonctionner comme sources d'information.

Ces conditions seraient les suivantes :

— Accumulation d'une néguentropie élevée (surpeuplement des niveaux quantiques à énergie élevée et états de résonance multiples, pris dans le sens donné à ce terme par la théorie de la mésométrie) ;

— Structure moléculaire rigide donnant un temps relativement long de relaxation « longitudinale » empêchant ainsi la diffusion de l'énergie emmagasinée à travers le réseau ;

— Structure chimique ordonnée et différenciée des microsystèmes riches en énergie de résonance, pouvant donner une quantité d'information élevée ;

— Temps de relaxation transversale convenable dans l'interaction entre un microsystème oscillant et les microsystèmes voisins et une capacité de transmission d'un effet inductif à travers la molécule, deux conditions indispensables à l'entretien d'oscillations en chaîne.

Il semblerait d'après notre analyse du chapitre IV, 3, que certaines macromolécules et les acides nucléiques en particulier, pourraient répondre à ces caractéristiques.

— Grâce à un couplage adéquat des acides nucléiques à des protéines, en résonance avec leur structure, les protéines fonctionnent comme catalyseurs spécifiques. L'alimentation en néguentropie des générateurs d'information pourrait être assurée ainsi, la source d'énergie sous forme de dérivés phosphorylés étant d'origine externe.

2. Comment pourrait-on vérifier si l'hypothèse proposée est valable ou non ?

Plusieurs voies d'accès semblent possibles pour aborder ce problème.

Nous voudrions en citer quelques-unes :

— Soumettre de nombreux phénomènes d'ordre biologique et physiologique, non mentionnés dans cette étude, à une analyse, afin de vérifier si leur interprétation cadre avec l'hypothèse en question ;

— Approcher par voie de calcul la détermination des conditions structurales et thermodynamiques d'une molécule ADN, compte tenu de nos connaissances actuelles dans ce domaine et confronter ces résultats avec l'hypothèse ;

— Entreprendre un programme expérimental pour :

1° *Etudier le rôle des messages électromagnétiques codés :*

— dans la réactivité de certaines molécules dont on peut calculer les transitions quantiques ;

— dans les « masers » fonctionnant comme oscillateurs ou comme amplificateurs ;

— en physiologie et en particulier sur les cellules sensibles à la lumière ou aux rayons infrarouges ;

— dans l'activité enzymatique de la cellule.

2° *Explorer* dans quelle mesure il serait possible de provoquer

des émissions cohérentes dans les ADN et les ARN, *in vitro*, sous l'effet des photons en résonance avec les transitions quantiques des bases aminées dans les spectres infrarouges et ultraviolets, le flux des photons étant modulé suivant un code à déterminer.

3. Wiener, le père de la cybernétique, a senti dès l'origine de son œuvre (1948) les incidences profondes que pourrait avoir la cybernétique sur la biologie.

Nous voudrions, pour terminer, citer une phrase de Brillouin extraite de son livre, paru en 1956, en langue anglaise, *Science and Information Theory* :

« La théorie de la relativité est apparue au début par rapport à la
« mécanique classique comme une théorie apportant des correcti-
« ons d'ordre mineur ; les applications de l'énergie nucléaire mon-
« trent l'importance capitale de la relation entre la masse et
« l'énergie. De même la relation entre l'entropie et l'information
« pourrait apparaître comme capitale dans un domaine à dé-
« couvrir ».

Nous supposons que Brillouin, en écrivant cette phrase, a pensé à la biologie.

Nous voudrions remercier M. Ponte, Directeur général de la Compagnie Générale de T.S.F. et M. Warnecke, Directeur du Centre de physique électronique et corpusculaire de la Compagnie Générale de T. S. F. pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à cette étude, menée en dehors du cadre de nos occupations habituelles.

ANNEXE I

Quelques définitions utilisées dans la théorie de l'information

I. DÉFINITION D'UNE SOURCE D'INFORMATION

Peut être considéré comme source primaire d'information, tout système physique capable de fournir une certaine quantité d'information à la sortie sans en recevoir à l'entrée. Si le système fournit à la sortie une certaine information sous l'effet d'une information appliquée à l'entrée, on se trouve en présence d'une source secondaire.

La quantité d'information délivrée par le système q_i est définie conformément à la théorie générale de l'information par

$$q_i = -\log_2 P_0 \quad (1)$$

ou par

$$q_i = -\sum_1^m p_i \log_2 p_i \quad (1 \text{ bis})$$

P_0 est le nombre d'états ordonnés ou messages équiprobables ;

q_i est exprimé en bits, pour un système de base binaire ;

θ_r , période de répétition des messages identiques (fig. 2).

Le débit d'information de la source est défini par

$$C_i = \frac{q_i}{\theta_r} \text{ (bits/s)} \quad (2)$$

Une quantité d'information ne peut être ni créée ni transmise ou reçue sans support énergétique. Ce support peut avoir une amplitude variant lentement ou rapidement par rapport à la durée des messages.

Dans le premier cas, le signal d'information a une structure video-fréquences avec une période de répétition $\theta_r > \theta_{max}$ (θ_{max} , durée maximum d'un état probable).

Si l'information est communiquée par la source à des effecteurs, par voie de rayonnement, le support de l'information est un signal périodique dont la période d'oscillations θ_o doit être telle que

$$\theta_o < 2\theta_{min}$$

θ_{min} , durée minimum d'un état probable.

Le support \bar{A} est caractérisé par son énergie et par son information.

La quantité d'information est transmise sur ce support par un des nombreux procédés connus de modulation.

Il a été établi que la création de 1 bit d'information doit être payée par une dépense énergétique $> 10^{-16}$ ergs environ.

(1) Si l'on a m messages non équiprobables : p_i , probabilité du message i .

En conclusion : une source d'information est caractérisée essentiellement par :

- sa quantité d'information q_i en bits ;
- son débit d'information C_i en bits par seconde $= \frac{q_i}{\theta_r}$;
- l'énergie du support d'information W_{inf} en ergs ;
- la capacité énergétique du support d'information, définie par $I = \frac{W_{information}}{T}$ en ergs par degré centigrade, T étant la température absolue, θ_r la période de répétition ⁽¹⁾.

La quantité et le débit d'information de la source ne prennent un sens physique véritable qu'en rapport avec l'effecteur et, en particulier, avec la bande passante de celui-ci.

2. NOMBRE D'ÉTATS PROBABLES DANS UNE INFORMATION

On discute parfois sur le sens exact à donner au terme : nombre d'états ordonnés, P_o , d'une source d'information.

Examinons, en effet, le cas d'un relais électromécanique parcouru par un courant variable à haute fréquence.

L'action mécanique du relais répond aux variations de la valeur moyenne du courant électrique dans la bobine du relais.

L'électromécanicien dira que le nombre d'états ordonnés est celui qui fait agir le relais.

Si cette bobine excite également un haut-parleur ou un tube cathodique de télévision, le nombre d'états ordonnés nous paraîtra beaucoup plus élevé.

La valeur de P_o à prendre en considération dépendra donc chaque fois de la bande passante de l'effecteur.

En particulier si l'effecteur se comporte comme un filtre passe-bas, on a la relation

$$2\theta_{min} \Delta f \geq 1$$

Δf , bande passante de l'effecteur ;

θ_{min} , durée minimum d'un état probable.

⁽¹⁾ Dans le cas d'oscillateurs moléculaires biologiques, la redondance est voisine de 1.

ANNEXE II

Conditions générales dans une transformation d'un système passif en système actif

I. CONDITIONS THERMODYNAMIQUES

a) *Première condition thermodynamique d'amorçage d'oscillations du support d'information dans un système passif.*

Nous allons appliquer la relation (13) à un système supposé isolé et siège de transformations isothermes.

Supposons un système passif caractérisé à l'état initial par N_o , J_o et S_o ($I_o = 0$).

Quelle doit être la transformation thermodynamique dans le système pour qu'à l'état final apparaisse une capacité énergétique d'information égale à I ?

A l'état initial, on a

$$\Delta N_o = -\Delta(J_o + S_o) \quad (15)$$

A l'état final :

$$(\Delta N_1 + I) = -\Delta(J_1 + S_1) \quad (16)$$

Posons

$$\Delta(N_1 - N_o) = \Delta N \quad (17)$$

$$\Delta(J_1 - J_o) = \Delta J \quad (18)$$

$$\Delta(S_1 - S_o) = \Delta S \quad (19)$$

En retranchant (15) de (16) on obtient

$$(\Delta N + I) = -(\Delta J + \Delta S)$$

D'où l'on peut tirer

$$\Delta N_{\text{amorçage}} = -(I + \Delta J + \Delta S) < 0 \quad (20)$$

$$\Delta N_a < 0$$

car $I > 0$ par définition et

$$(\Delta J + \Delta S) \geq 0$$

en vertu du deuxième postulat de Carnot.

La capacité énergétique du support d'information I créée dans le système à l'amorçage d'oscillations s'exprime par

$$I = -\Delta(N_a + J + S) \quad (21)$$

La relation (20) forme la première condition d'amorçage d'oscillations dans un système passif.

Cette condition peut s'énoncer comme suit :

Un système passif ne peut devenir générateur d'information qu'en perdant, à l'amorçage d'oscillations du support énergétique de l'information, une certaine quantité de néguentropie $= \Delta N_{\text{amorçage}}$.

Celle-ci est égale à la somme de l'information créée et de l'accroissement de l'entropie positive totale dans le système.

b) *Deuxième condition thermodynamique dite d'entretien d'oscillations.*

Nous allons établir le bilan énergétique dans un générateur d'information isolé par son entrée.

En introduisant dans la relation (20) la température T , on obtient

$$-T \Delta N = T(I + \Delta J + \Delta S) \quad (22)$$

L'énergie du support d'information créée peut être divisée en deux parties externe et interne W_e et W_i :

$$W_e = I_e T \quad (23)$$

$$W_i = I_i T \quad (24)$$

$$I = I_e + I_i \quad (25)$$

I_e représente la part de la capacité énergétique d'information susceptible de quitter le système, si ce dernier cesse d'être isolé quant à sa sortie ;

I_i représente la part de la capacité d'information, solidaire du système, formant un réservoir d'énergie d'information. L'énergie oscillante W_i est tantôt en état cinétique, tantôt en état potentiel.

Elle est reconvertie en néguentropie à l'arrêt d'oscillations du système.

La relation (20) peut donc s'écrire de la manière suivante :

$$-\Delta N_{\text{amorçage}} = (I_i + I_e + \Delta J + \Delta S) \quad (26)$$

I_i représente une capacité énergétique indépendante du temps, tandis que $(I_e + \Delta J + \Delta S)$ s'accroît avec le temps. Par exemple, dans un oscillateur électrique, l'effet Joule s'exprime par

$$W_J = Ri^2t = T\Delta J$$

d'où

$$\Delta J = \left(\frac{Ri^2}{T}\right)t$$

De même, l'énergie utile du support d'information s'exprime par

$$W_e = uit = I_e T$$

d'où

$$I_e = \left(\frac{ui}{T}\right)t$$

De même

$$\Delta S = (k\Delta f)t$$

Dans ces expressions t représente le temps et R , u et i sont respectivement la résistance ohmique, la différence de potentiel et l'intensité du courant électrique, k est la constante de Boltzmann et Δf la bande passante de l'effecteur.

Il est facile de se rendre compte que si le système oscillant restait isolé par son entrée, il épuiserait rapidement sa néguentropie et cesserait d'osciller.

On peut en conclure qu'un système isolé par son entrée ne peut pas fonctionner longtemps comme source d'information.

La deuxième condition thermodynamique est basée sur le deuxième postulat de Carnot généralisé qui s'exprime par

$$\Delta(J + S) = -\Delta(N + I) \geq 0$$

Comme nous l'avons vu précédemment, le système actif perd une néguentropie :

$$\Delta N_{\text{pertes}} = - (I_e + \Delta J + \Delta S) \quad (27)$$

La source extérieure, couplée à l'entrée du générateur d'information doit donc fournir à celui-ci une néguentropie :

$$\Delta N_{\text{alimentation}} = (I_e + \Delta J + \Delta S) \quad (28)$$

La deuxième condition thermodynamique peut donc s'énoncer comme suit :

Tout générateur d'information doit être alimenté en néguentropie par une source adaptée pour compenser les pertes en information et l'accroissement de l'entropie positive totale du système.

Nota. — Si le système est isolé à sa sortie ($I_e = 0$), il faut fournir au système une alimentation en néguentropie égale à

$$\Delta N_{\text{alimentation à vide}} = (\Delta J_v + \Delta S_v), \quad (28 \text{ a})$$

ΔJ_v et ΔS_v étant les entropies positives à vide.

c) *Troisième condition thermodynamique.*

Nous allons établir le bilan de néguentropie dans un générateur d'information alimenté par son entrée. A l'amorçage d'oscillations, le système devait perdre une néguentropie égale à

$$\Delta N_{\text{amorçage}} = -(I_i + I_e + \Delta J + \Delta S)$$

avec

$$I = I_i + I_e$$

Dès que la source d'alimentation extérieure commence à fonctionner, elle restitue au système

$$\Delta N_{\text{alimentation}} = (I_e + \Delta J + \Delta S)$$

Le bilan global de néguentropie du système par rapport à son état avant l'amorçage d'oscillations s'exprime par

$$\Delta N_{\text{interne}} = \Delta N_{\text{amorçage}} + \Delta N_{\text{alimentation}}$$

$$\Delta N_{\text{interne}} = -I_i \quad (29)$$

La troisième condition thermodynamique peut s'énoncer comme suit :

Après l'amorçage d'oscillations, la source de néguentropie étant en fonctionnement, le système doit rester en équilibre thermodynamique avec une néguentropie diminuée d'une quantité égale à l'information du réservoir énergétique I_i , solidaire du système et oscillant entre un état potentiel et un état cinétique. ΔN interne se trouve restituée au système quand celui-ci cesse d'osciller.

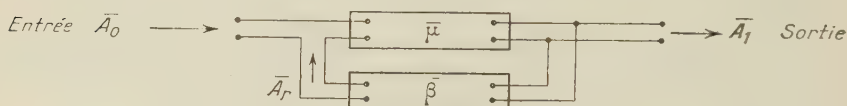


Fig. 7. — Schéma d'un oscillateur ou d'un amplificateur à réaction.

2. CONDITION STRUCTURALE

Supposons qu'on applique à l'entrée d'un système un signal oscillant d'amplitude \bar{A}_0 (fig. 7).

Si ce système comporte un coefficient d'amplification $\left(\bar{\mu} = \frac{\bar{A}_{\text{sortie}}}{\bar{A}_{\text{entrée totale}}}\right)$ et un coefficient de réaction $\left(\bar{\beta} = \frac{\bar{A}_r}{\bar{A}_1}\right)$, la fonction de transfert du système s'exprime par

$$\bar{G} = \frac{\bar{A}_1}{\bar{A}_0} = \frac{\bar{\mu}}{1 - \bar{\mu}\bar{\beta}} \quad (30)$$

Dans le cas d'un auto-oscillateur, il faut satisfaire la condition

$$\bar{A}_1 \neq 0 \text{ pour } \bar{A}_0 = 0, \text{ donc } G = \infty$$

Celle-ci se trouve, en effet, satisfaite pour

$$\boxed{\frac{\Delta \bar{A}_r}{\Delta \bar{A}_0} = \bar{\mu} \cdot \bar{\beta} = +1} \quad (31)$$

$\bar{\mu}$ et $\bar{\beta}$ sont des grandeurs sans dimensions, indépendantes de l'équilibre thermodynamique et elles sont définies par la structure physique et géométrique du système.

Cette condition structurale doit être satisfaite dès l'amorçage d'oscillations et peut s'énoncer comme suit :

Pour qu'un système passif puisse se transformer en auto-oscillateur, il est nécessaire que sa structure physique et géométrique permette à

une perturbation du signal naissant $\Delta\bar{A}_0$ de se propager le long du système et de ramener à la source de perturbation un signal de réaction $\Delta\bar{A}_r$ égal en amplitude et en phase au signal d'origine.

\bar{A} est le signal support d'information.

3. QUANTIFICATION DES CONDITIONS D'AMORÇAGE ET D'ENTRETIEN D'OSCILLATIONS DANS UN POLYMASER BIOLOGIQUE

Nota. — Ces relations ont été établies en négligeant les pertes Joule et les pertes par émissions et absorptions statistiques dans une macromolécule.

Nous allons résumer les conditions quantiques correspondant aux relations (A) à (D) du chap. IV p. 166.

1° La condition (A) est remplacée par la relation (A') :

$$-\Delta N_{\text{amorçage}} \cong I \cong \frac{I}{T} \sum_{1}^M \sum_{1}^S n_d h \nu_{mnd} \quad (A')$$

— $\Delta N_{\text{amorçage}}$, perte en néguentropie par le « polymaser » codé à l'amorçage d'oscillations ;

M, nombre total de microsystemes indépendants formant l'ensemble du polymaser multiplex codé (nombre de ADN dans le cas de la cellule) ;

s, nombre de transitions oscillantes au cours d'une période de répétition dans un microsysteme indépendant (un ADN) ;

n_d , nombre de photons émis par la transition oscillante d'indice d ;

h , constante de Planck ;

ν_{mnd} , fréquence de photons de la transition d'indice d et correspondant aux niveaux quantiques m et n ;

T, température absolue du système ;

I, entropie négative d'information = $\frac{W_{\text{information}}}{T}$.

2° La deuxième condition d'amorçage (B) du chap. IV, p. 166, donnant la loi de cohérence en fonction du temps de l'interaction

entre le champ électromagnétique et les transitions oscillantes, devra être remplacée par une équation basée sur la mécanique quantique.

Soit

$$\psi_d = c_{1d}\psi_{1d} + c_{2d}\psi_{2d} + \dots,$$

ψ_d , fonction d'onde relative au micro-système dont la transition oscillante d'indice d est considérée ;

ψ_{1d}, ψ_{2d} , fonctions d'onde d'états quantiques stationnaires 1, 2, etc ;

c_{1d}, c_{2d} , coefficients complexes donnant les probabilités relatives à ces états stationnaires.

En partant de l'équation ci-dessus, il faudra établir la relation entre les coefficients complexes de manière que l'état de superposition des fonctions d'onde satisfasse en amplitude et en phase, la condition de réaction, nécessaire à l'amorçage et à l'entretien des transitions oscillantes d'indice d et par voie de généralisation, les oscillations en chaîne à travers toute la molécule d'un ADN. Cette étude reste à faire.

3° La troisième condition (C) d'alimentation en néguentropie est remplacée par (C') :

$$\Delta N_{\text{alimentation}} / \text{seconde} = \frac{1}{T} \sum_1^M \sum_1^S \left(\frac{n_d' h \nu_{mn_d}}{\theta_{rB}} \right) \quad (C')$$

θ_{rB} , période de répétition d'un cycle d'oscillations dans un ADN d'indice B.

4° La quatrième condition (D) d'entretien d'oscillations détermine la néguentropie transformée en information I_i et emmagasinée dans le champ électromagnétique sous forme d'entropie négative d'information, solidaire du système.

Celle-ci s'exprime par (D') :

$$-\Delta N_{\text{interne}} = I_i = \frac{1}{T} \sum_1^M \sum_1^S \left(\frac{n_d' h \nu_{mn_d}}{2} \right) \quad (D')$$

n'_d , nombre de photons solidaires du champ électromagnétique interne et servant à l'entretien des oscillations dans la molécule pour la transition d'indice d .

ANNEXE III

RAPPEL DE QUELQUES PROPRIÉTÉS DES MOLÉCULES CONJUGUÉES ⁽¹⁾

Les molécules conjuguées (par exemple, les bases aminées dans les acides nucléiques) représentent, à cause de la mobilité de leur cortège électronique, un milieu fluide fortement délocalisé, où une perturbation subie par la distribution des charges en un point quelconque se répercute immédiatement sur l'ensemble de la périphérie.

La méthode de mésomérie traduit l'existence des liaisons délocalisées en admettant que la molécule ne saurait être décrite d'une façon satisfaisante par une seule formule symbolisant une distribution bien déterminée des liaisons multiples, mais qu'il faut nécessairement utiliser plusieurs formules simultanément. On dit que la molécule résonne entre ces différents schémas de valence et que sa structure vraie est intermédiaire entre celles qui symbolisent ces différentes formules et ne peut être représentée que par une superposition pondérée de celles-ci.

La fonction d'onde de la molécule ψ est une combinaison linéaire des fonctions d'onde ψ_1, ψ_2, \dots attribuables à chacune de ces formules :

$$\Psi = a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2 + \dots$$

Les carrés des coefficients a_1, a_2, \dots représentent les probabilités de chaque formule dans la représentation de la molécule réelle.

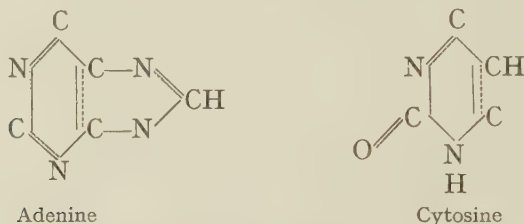
L'énergie de résonance suivant la théorie de la mésomérie, ou l'énergie de délocalisation suivant la méthode des orbitales moléculaires, est la différence entre l'énergie vraie de la molécule obtenue en tenant compte de la délocalisation des électrons et l'énergie hypothétique qu'elle aurait, si elle était représentée par une des formules classiques à liaisons localisées. Plus grand est le nombre de formules permettant d'exprimer l'état énergétique de la molécule conjuguée, plus grande est son énergie de résonance.

La capacité d'emmagasiner de l'énergie dans la molécule est en rapport direct avec son énergie de résonance.

⁽¹⁾ Basé sur l'ouvrage de P. PULLMAN, *La structure moléculaire*.

⁴ *L'énergie d'excitation*, ou de transition, est la différence entre l'énergie d'un état excité de la molécule et l'énergie de son état fondamental. L'énergie d'excitation caractérise la position de ses bandes spectrales d'émission ou d'absorption. Les différents états excités s'obtiennent en faisant passer un ou plusieurs électrons d'une orbitale occupée sur une orbitale non occupée.

Nous avons représenté, ci-dessous, la structure chimique de deux bases aminées : adénine et cytosine. Les traits mixtes indiquent des liaisons pourvues de fortes énergies de résonance.



--- Liaisons riches en énergie de résonance.

ADDENDA

HYPOTHÈSE CONCERNANT LE MODE D'OSCILLATIONS DANS UNE MACROMOLÉCULE DU TYPE ADN DANS LES CELLULES VIVANTES

Pour rendre plus claire notre hypothèse concernant le mode d'oscillations électromagnétiques présumées dans les ADN des cellules vivantes, nous commencerons par décrire un modèle hydrodynamique présentant une analogie très grossière avec notre oscillateur moléculaire.

Supposons une série de vases communicants disposés en circuit fermé, par exemple en anneau, et remplis d'un liquide.

Admettons par ailleurs que le liquide dans chaque vase puisse atteindre deux niveaux déterminés, dont un inférieur m et le second supérieur n , ce dernier correspondant au plan de communication entre ce vase et l'un des vases voisins, sans que le liquide en état statique puisse passer d'un vase à l'autre.

Supposons enfin, que de nombreux vases du système soient remplis à leur niveau maximum et qu'une perturbation apparaisse dans

l'un de ces vases (en y jetant un caillou, par exemple). Cette perturbation va créer, dans ce vase, un régime d'ondulations à la surface du liquide et une partie de ce dernier pourra passer vers le vase voisin et y provoquer à son tour un régime d'oscillations à la surface.

La perturbation en atteignant un vase y provoque un régime d'oscillations dont la fréquence propre et la durée dépendent des propriétés physiques et géométriques du vase en question, du liquide et éventuellement des « réactions » des vases voisins.

Si la perturbation, en se propageant, rencontre tout le long de son trajet des vases dont les crêtes d'oscillations provoquées font dépasser au liquide le plan de communication avec les vases voisins, le régime perturbé pourrait revenir à son point d'origine, après avoir fait un tour complet pendant une durée Θ_r .

L'« onde retour » pourrait rencontrer le vase d'où est partie la perturbation dans deux états distincts :

— soit au repos, c'est-à-dire qu'entre-temps les oscillations ont cessé dans le vase ;

— soit que le régime oscillant s'y soit maintenu.

Dans la première hypothèse, un nouveau cycle d'oscillations pourrait recommencer dans le système, sous l'effet de l'« onde retour ».

Dans la seconde hypothèse, l'effet de l'« onde retour » dépendra de la phase relative de l'« onde locale » et de l'« onde retour » et selon sa valeur, l'onde résultante pourra être renforcée ou affaiblie. S'il y a renforcement d'amplitude, un régime permanent d'oscillations pourrait s'établir dans l'ensemble des vases.

Dans les deux hypothèses, on voit qu'il existe une possibilité d'un régime périodique d'oscillations :

— dans le premier cas, au cours de chaque cycle, une période d'oscillations sera suivie d'une période de repos, suivant une certaine loi d'amortissement (voir fig. 2) ;

— dans le second cas, on assistera à des oscillations permanentes dans tous les vases.

Un régime mixte comportant un certain nombre de vases qui fonctionneraient par impulsions et d'autres en régime permanent, serait également possible.

Si le système décrit ci-dessus était isolé de l'extérieur, le régime d'oscillations y cesserait après un certain temps, grâce aux pertes par frottement du liquide contre les parois des vases.

Supposons par contre, que le système ne soit isolé ni par sa sortie, ni par son entrée.

Par sa sortie, il peut communiquer vers l'extérieur son régime d'oscillations, en déversant par exemple, une partie du liquide à travers des trous placés dans les tubes communicants.

Par son entrée, il est branché à une source capable de compenser les pertes en liquide et les pertes par frottement du système.

Il suffit que la source d'énergie extérieure soit asservie au liquide quittant le système oscillant, pour que ce dernier puisse maintenir indéfiniment ses oscillations.

* * *

Le modèle hydrodynamique décrit ci-dessus nous aidera à saisir plus facilement le mode d'oscillations, attribué par notre hypothèse aux ADN des cellules vivantes.

Remplaçons dans notre modèle :

a) les vases oscillants et leurs tubes communicants par des microsystemes constitués par des bases aminées, reliées entre elles par des sucres et des phosphates ;

b) les niveaux maxima dans les vases par les états excités des bases aminées et les niveaux minima par les états fondamentaux de ces bases (deux niveaux quantiques) ;

c) le liquide en état statique par l'énergie potentielle interne des microsystemes, et, l'énergie contenue dans les vagues, par l'énergie des photons rayonnés sur des fréquences

$$\nu_i = \frac{(W_{excitée} - W_{fondam.})_i}{h} (1)$$

d) la source extérieure d'entropie négative — constituée par un réservoir sous pression dans le cas du modèle — par l'énergie libérée des composés phosphorylés dans le cas des ADN ; les protéines associées aux ADN assurant le contrôle de l'hydrolyse en question.

La stabilité chimique des ADN serait maintenue, en transférant à ceux-ci, dans des conditions convenables, l'énergie libérée au cours de l'hydrolyse.

(¹) L'énergie quantifiée, liée aux informations, est ainsi émise par les ADN, soit sous forme de photons, soit sous forme d'excitons, c'est-à-dire des paquets d'ondes entraînant des couples associés et trous d'électrons pouvant se séparer dans des matériaux semi-conducteurs.

LA CELLULE VUE COMME MODÈLE CYBERNÉTIQUE QUANTIQUE
ÉLECTROMAGNÉTIQUE ⁽¹⁾*L'aspect cybernétique.*

La cybernétique est, avant tout, une méthode de raisonnement qui permet de concevoir ou d'analyser le fonctionnement de tout système organisé en vue d'exécuter efficacement un certain programme imposé par des sources d'information, soit d'origine interne, soit d'origine externe par rapport au système considéré.

Toutes nos connaissances sur le fonctionnement de la cellule vivante nous permettent d'y déceler un comportement cybernétique. On y constate, en particulier, la présence d'un programme, des effecteurs et des asservissements automatiques.

Comme nous l'avons remarqué dans le préambule, il ne s'agit pas, dans cette étude, d'introduire ou d'exclure la finalité dans la vie cellulaire, au sens philosophique du terme, mais d'appliquer une méthode analytique à un « système finalisé », au sens cybernétique, c'est-à-dire, dans le cadre des lois physiques d'homeostasie des systèmes complexes.

L'aspect quantique.

La cellule considérée comme système cybernétique, nous conduit inévitablement vers la mécanique quantique. En effet,

a) Les microsystèmes biochimiques dont est composée la cellule (acides nucléiques, protéines, enzymes, etc...) jouent chacun un rôle bien défini à l'intérieur de la cellule. Or, ces microsystèmes sont des molécules chimiques et les lois quantiques sont de rigueur à cette échelle.

b) Quel est l'apport nouveau des lois quantiques dans un système cybernétique ?

Il nous semble que cet apport est considérable.

On sait, en effet, que le degré d'efficacité dans l'exécution d'un programme complexe et précis dépend essentiellement de :

— la finesse de structure de l'information fournie par les générateurs et de leur stabilité dans le temps, et de :

— la sensibilité, la sélectivité (ou spécificité), la fidélité et enfin la stabilité des effecteurs et des organes de commande et d'asservissement.

(1) Dans un essai en cours de préparation, les problèmes abordés dans ce chapitre seront traités avec plus de détails.

On peut démontrer d'après la théorie — et les récents résultats obtenus dans le domaine des « masers » l'ont confirmé — que les oscillateurs, les amplificateurs et les effecteurs quantiques présentent toutes les qualités énumérées ci-dessus à un degré insoupçonnable à notre échelle.

La stabilité des gènes, la précision dans la biosynthèse, la sensibilité des cellules de la rétine sont autant d'exemples remarquables qui rappellent les qualités d'un système cybernétique quantique.

L'aspect électromagnétique.

Il est connu qu'un système cybernétique ne peut pas fonctionner sans information. Celle-ci sert à définir le programme à exécuter, ainsi qu'à assurer les asservissements automatiques.

1. Il nous paraît difficile d'imaginer un mode de génération et de transmission d'une information aussi subtile que celle nécessaire au fonctionnement d'un modèle cybernétique quantique analogue à celui d'une cellule vivante, sans l'intervention des photons comme support énergétique de l'information transmise à distance.

2. Notre choix des bandes spectrales des photons allant de l'infrarouge à l'ultraviolet se justifie, à notre avis, par les considérations suivantes :

a) L'énergie quantifiée nécessaire pour déclencher les phénomènes d'autocatalyse, que l'on rencontre partout en biologie, varie entre quelques Kcal/mole et 100 Kcal/mole environ. Ces valeurs correspondent à des fréquences des photons allant de 10^{13} à 10^{15} c/s, ou à des longueurs d'onde λ de 30 à 0,3 μ environ (infrarouge, visible et ultraviolet).

b) La sensibilité exceptionnelle des effecteurs biologiques ne peut s'expliquer que dans l'hypothèse d'émissions d'informations situées pratiquement en dehors du spectre de rayonnement thermique (c'est-à-dire dans les bandes des fréquences supérieures à 10^{13} c/s).

c) Le débit d'information (quantité d'information par unité de temps) peut être d'autant plus grand que la fréquence du support est plus élevée. Or, la précision ou la finesse dans le fonctionnement des effecteurs et des servo-mécanismes est d'autant plus grande que la durée minimum d'un message probable θ_i minimum est plus petite, c'est-à-dire que la fréquence du support énergétique est plus élevée, puisque :

$$\theta_i \text{ min. } \geq \frac{1}{2 f_{\text{support}}}$$

D'après le chapitre III on peut se rendre compte que la vie cellulaire exige la mise en œuvre d'une information ayant une structure très fine.

d) Enfin, on a trouvé expérimentalement que les spectres d'absorption dans les bases et dans les acides aminés (molécules oscillantes dans les acides nucléiques et dans les protéines — selon l'hypothèse) correspondent à des bandes de fréquences situées entre $0,25 \mu$ et 10μ environ.

3. L'argument essentiel en faveur des ondes électromagnétiques nous semble toutefois résider dans l'ultra-structure cellulaire des macromolécules et des organelles, telle qu'elle nous a été révélée au cours des dix dernières années grâce à l'emploi du microscope électronique.

En effet, cette ultra-structure prend toute sa signification dans le cadre de l'hypothèse cybernétique, où les informations ont un support électromagnétique :

a) La ressemblance de l'ultra-structure des photo-récepteurs (chloroplastes, segments des cellules rétinienne) avec celle des membranes entourant les organelles dans toutes les cellules, montrerait qu'il y a également analogie de fonction. Or, dans les photo-récepteurs il s'agit bien d'une transformation de l'énergie contenue dans des ondes électromagnétiques d'origine externe en énergie chimique dans le cadre de la photosynthèse ou du processus de la vision (Voir les travaux de M. Calvin).

La « mémoire » dans ce système cybernétique serait assurée grâce à la capacité des molécules biologiques de garder pendant une certaine durée des informations quantifiées sous forme d'états excités.

b) Le rôle biophysique essentiel attribué par A. Szent Gyorgyi à l'eau qu'il dénomme « matrice de la vie », pourrait trouver toute son importance dans le cadre de cette hypothèse. Grâce à sa mobilité et à ses propriétés diélectriques particulières, l'eau pourrait assurer l'accord et l'adaptation variables des structures résonnantes et contribuer ainsi efficacement au déroulement du « programme cellulaire ».

c) Les structures que l'on rencontre systématiquement dans les macromolécules biologiques et dans les organelles rappellent étrangement des structures employées en hyperfréquences (hélices — dans les molécules biologiques d'une part et dans les générateurs et amplificateurs à onde progressive d'autre part — lignes

interdigitales — dans les photo-récepteurs biologiques d'une part et dans les accélérateurs linéaires des particules d'autre part).

Ces structures biologiques vues comme cavités, guides ou filtres électromagnétiques dans les spectres ultraviolet, visible et infra-rouge, en combinaison avec les phénomènes de résonances quantiques dans les molécules biologiques et avec leurs propriétés de matériaux semi-conducteurs, donneraient, peut-être, la clé permettant d'aborder avec plus de succès l'interprétation du fonctionnement des cellules et des organismes vivants.

Limitations of Cybernetics

by Dr. Rajko TOMOVIC,

(Belgrade)

When speaking of cybernetics it must be explained to which of its different meanings we refer.

Certain authors tend to interpret this science in a very general sense as the common basis of automatic control in machines, living matter and society. Even the explanation of some intellectual activities of man is sought in analogy to machines (computers).

Such an attitude leads to the conclusion that, in the future, machines will be available to replace man in most of his activities (mechanical translation, learning machines, automatic factories).

Another trend considers cybernetics as an important research field but considers it to be more modest in its scope. The subject of this research field should be the general theory of feedback control systems, from the most elementary to the most advanced ones. Taking into account the complexity of some modern control systems, it is obvious that the vast theoretical foundations of cybernetics are still present but no attempt is made to apply the results to living matter.

Finally, there is a tendency to stay within the scope of the existing scientific fields. It is considered that the foundations which have been laid down are not firm enough to constitute an autonomous theory.

Our intention is not to evaluate these different trends in cybernetics. We wish to point to those facts which, in our opinion, have been overlooked in many discussions.

Firstly, the experimental results in cybernetics are still extremely meagre when compared with the enthusiastic declarations and predictions. Secondly, there is often too much freedom in interpreting the advances in electronics, computers, information theory, etc... at least compared to the more careful presentation of new facts in other sciences.

Such an attitude is not without consequences. Public opinion is beginning to think that important technological changes are imminent; the actual capacities of machines and automation are overemphasized and, instead of concentrating efforts on concrete results, much energy is being lost in heated discussions without adequate experimental grounds.

In order to explain our attitude better, we shall very briefly review the most important scientific results which are supposed to justify the very optimistic conclusions of some cyberneticians.

COMPUTERS

Instead of discussing to what extent the computer can replace man and serve as analogy for his intellectual activities, let us turn the question the other way round. There are certain features of brain activity which definitely cannot be associated with actual computers. Our question is: Are not these differences far too great when compared with some supposed similarities?

The first point is the computer storage. How sure are we that the brain storage operates in terms of independent, well defined cells with binary states or with delay lines. Even if it were so, what a formidable task it would be to convert all sensations, pictures and knowledge into binary informations and to store them. This is certainly an exaggeration, but we tacitly imply some analogy when comparing brain cells to storage capacity in machines, or use the term "machine memory" in a broader sense than a mere terminus technicus.

Next comes the addressing system. It is hardly possible to imagine such a giant storage in a brain with a rigid, deterministic, exactly planned addressing system where each bit of information is treated as an individual unit. And what is to be said about the unique feature of the brain to shift centres of specialised activities — or "programs", in terms of analogy — from one place to another in case of lesions.

Recently some papers on so-called learning and adaptive programs have appeared. Taking the terms as well defined, there is a striking difference regarding the learning capacities of man. At this stage, it is impossible to think of such an ingenious starting program for a computer which would continue for years and years to adjust the machine to steadily changing situations.

The problem of self-organisation, reproduction and deterministic

design has hardly been tackled by exact methods. Supposing even that we have at our disposal the enormous storage capacities of the brain and sufficiently powerful programs, we would need almost all our intellectual resources to design in every detail the switching and the control system for such a computer.

The electronic computer is certainly an outstanding achievement, but its weaknesses as a cybernetic machine are only too obvious. If only one of the thousands of connections fail, the "giant brain" will fail as well. There is not the slightest hierarchy in the whole wiring system of the computer.

We are probably going in the right direction with digital computers, but the way is too long to speak now of "giant" and "electronic" brains.

MECHANICAL TRANSLATION

Judging by the quality of some mechanical translations, one might conclude that the problem is in an advanced stage. It is, however, very doubtful if the present approaches to mechanical translation open any bright prospects. Information theory and all kinds of statistical language analysis have demonstrated in a clear way that an unexpectedly large part of its structure is redundant and invariant. Unfortunately, the real problem is not in the invariant statistical structure, but in the difficulty of filling the relatively few, but crucial gaps.

It is self-deceit to substitute successes in mechanical translation of special sets for general solution of the translation problem. A good human translator uses much subtler ways to fill the correct words into a given text than the fixed grammatical or other rules. Take the simple fact that a good translation is impossible without full knowledge of the subject. The translation problem is rooted much deeper in the very origins of thought and language and there is no use in overlooking the great difficulties ahead.

AUTOMATION

It is surprising that an enormous variety of automatic systems, from simple on-off temperature regulators to space rockets, use again and again the same principle of feedback. The great merit of cybernetics is to have shown the general significance of feedback in nature. At one stage of growth, it has become evident

that applications of feedback are in no way restricted to mechanical systems. It must be mentioned, however, that concrete results in the application of new ideas are still very few. In the study of human reactions from the point of view of cybernetics, it is important not only to know that some kind of feedback is present but also to analyze the system exactly, to determine all its constituent parts and its performance. Some steps have been taken in this respect, but the application of existing theoretical and mathematical tools of control theory to living feedback systems has yielded practically no results. Without the possibility of reconstructing theoretically all details of the operation of a feedback system, our knowledge about it is very limited.

Another point is how far one can go in the design of more complex automatic systems without new ideas. The principle of ultrastability introduced by W. R. Ashby is a real breakthrough in this regard. With the existing ideas about feedback and without such fundamental advances, it is difficult to arrive at a closer understanding of control processes in living matter. In the future, we shall need much greater experiences in designing actual automatic systems on new principles. As the situation stands now, ultrastability has not been incorporated, except for the homeostat, into engineering design. One cannot deny the great contribution which would result from design and experiences with engineering systems built on novel lines.

The few sceptic remarks about cybernetics should be interpreted in the right way. They are not intended to deny completely its value. There is no doubt that we are at the point where classical division of sciences is disappearing. Exchange of views and cooperation among scientists of various kinds is stimulating for all of them. The motives to which we object are of different origin. It seems that people who are too optimistic about cybernetics have brought their opinions much more to the foreground. Looking at cybernetics from a different angle will help in obtaining a more realistic view of its value. The great public interest in cybernetics calls also for a careful interpretation of the results. But what is most important, a clear distinction between scientific facts and speculation, a realistic view of achievements in the field will make our discussions more fruitful and the progress more rapid.